



Tesis - TM142501

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN
PENDINGINAN PADA *AXIAL BRUSHLESS
DIRECT CURRENT* (BLDC) MOTOR UNTUK
APLIKASI SEPEDA MOTOR LISTRIK GESITS**

**AGUS MUKHLISIN
NRP 2115202006**

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng
Dr. Muhammad Nur Yuniarto

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan



Tesis - TM142501

STUDY NUMERICAL AND EXPERIMENTAL A COOLING OF AXIAL BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR FOR ELECTRIC SCOOTER GESITS

AGUS MUKHLISIN
NRP 2115202006

SUPERVISOR
Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng
Dr. Muhammad Nur Yuniarto

MASTER PROGRAM
ENERGY CONVERSION ENGINEERING
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

Halaman ini sengaja dikosongkan



LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :
Agus Mukhlisin, ST
NRP. 2115202006

Tanggal Ujian : Senin, 17 Juli 2017
Periode Wisuda : Semester Genap 2016/2017

Disetujui oleh :

1. **Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng**
NIP. 196505051990031005
(Dosen Pembimbing I)
2. **Dr. Muhammad Nur Yuniarto**
NIP. 197506301998021001
(Dosen Pembimbing II)
3. **Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W, ME.**
NIP. 195312191981031001
(Dosen Penguji)
4. **Alief Wikarta, ST., M.Sc., Ph.D.**
NIP. 198202102006041002
(Dosen Penguji)
5. **Ary Bachtiar K P, ST. MT. Ph.D.**
NIP. 197205241997021001
(Dosen Penguji)

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)



Dekan Fakultas Teknologi Industri

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 196905071995121001



Halaman ini sengaja dikosongkan



Studi Numerik dan Eksperimen Pendinginan *Axial Brushless Direct Current (BLDC)* Motor untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik GESITS

Mahasiswa Nama : Agus Mukhlisin, ST
Mahasiswa ID : 2115202006
Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng
Co-Supervisor : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRAK

Setiap komponen yang beroperasi akan menghasilkan *Losses* berupa panas, termasuk pada *Brushless Direct Current (BLDC)* Motor. Panas pada BLDC Motor yang tidak dibuang secara baik dapat menyebabkan *Overheat*. *Overheat* pada motor listrik menimbulkan efek yang merugikan seperti degradasi isolasi kumparan, demagnetisasi, meningkatkan *Heat Loss*, penurunan efisiensi motor dan mengurangi life time motor listrik [2]. GESITS merupakan sepeda motor listrik hasil kolaborasi PT Garansindo Technologies dengan ITS. GESITS telah melakukan uji jalan dari Jakarta sampai Bali menggunakan *Axial BLDC* Motor. *Axial BLDC* Motor yang digunakan GESITS mengalami *Over Heat* setelah menempuh jarak 30 km di daerah Bekasi. BLDC Motor dipasang kipas eksternal untuk menambah pendinginan. Pengalaman tersebut menunjukkan pentingnya pendinginan untuk menjaga ketahanan *Axial BLDC* Motor.

Overheat pada *Axial BLDC* Motor dapat dapat dihindari dengan dua metode, yaitu dengan mengurangi sumber panas (memperkecil tahanan thermal, maupun memperkecil performa Motor (arus listrik) dan metode memperbesar perpindahan panas. Thesis ini memilih metode memperbesar perpindahan panas agar performa GESITS tetap sesuai spesifikasi yang telah ditawarkan. Untuk itu, thesis ini menggunakan pendekatan numerik yaitu *Computational Fluid Dynamic (CFD)* dengan Fluent 6.3.26 serta melakukan validasi secara eksperimen. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan Thermal Camera Flir T420 untuk memperoleh distribusi temperatur pada *Axial BLDC* Motor.

Distribusi temperatur di bagian cover casing lebih tinggi dibandingkan dengan heatsink. Daerah ini memiliki efektifitas yang rendah dan perlu diperhatikan desain pendinginan untuk lebih lanjut. Hasil simulasi menggunakan CFD tervalidasi dengan hasil eksperimen baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Error hasil simulasi dan hasil pengukuran $\pm 6.93\%$ sehingga hasil simulasi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi pendinginan pada *Axial BLDC* Motor ini. Temperatur *Winding* pada kecepatan 100km/jam adalah sebesar $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6.93\%$ dengan temperatur magnet sebesar $57.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6.93\%$. Berdasarkan hasil tersebut maka pendinginan *Axial BLDC* Motor Gesits ini aman sesuai kondisi operasi.

Kata kunci : Perpindahan Panas, *Axial BLDC* Motor, GESITS, *Forced Convection*, Fin, CFD



Halaman ini sengaja dikosongkan



Study Numerical and Experimental a Cooling of *Axial* Brushless Direct Current (BLDC) Motor for Electric Scooter GESITS

Student Name : Agus Mukhlisin, ST
Student Identity Number : 2115202006
Supervisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng
Co-Supervisor : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRACT

Each component which operates will result in losses of heat, including on Brushless Direct Current (BLDC) motor. It will affect the performance of the BLDC motor, it can even cause Overheat. Overheating in electric motor adverse effects such as degradation of insulation coil, demagnetization, increase heat loss, decrease in motor efficiency and reduce the life time of electric motors [2]. GESITS electric motorcycle is made with collaboration between PT Garansindo Technologies with ITS. GESITS has conducted road tests from Jakarta to Bali using *Axial* BLDC Motor. *Axial* BLDC Motor GESITS over heat after run with distance of 30 km in the area of Bekasi. Cooling fan mounted externally to add to the cooling of BLDC Motor. This experience shows that cooling of *Axial* BLDC Motor very importance to maintain the resilience.

Overheat on *Axial* BLDC motors can be done by two methods, there are by reducing the heat source, as well as reduce the performance of motor and enlarging the heat transfer. In this thesis choose the method of enlarging the heat transfer so the performance of GESITS keep on specification. This thesis uses a numerical approach is Computational Fluid Dynamics (CFD) by Fluent 6.3.26 and perform validation using experiments. The experiment was conducted using Flir T420 Thermal Camera to obtain the temperature distribution in *Axial* BLDC Motor and using thermal measurement with thermistor.

Distribution of temperature on the cover casing is higher than the heatsink. This area has a low effectiveness and needs to be considered cooling design for further. The simulation results using CFD are validated with experimental results both qualitatively and quantitatively. Error of simulation result and measurement result is $\pm 6.93\%$ so this simulation result can be used to evaluate cooling at Gesits *Axial* BLDC Motor. Winding temperature at the speed of 100km / h is $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6.93\%$ with magnetic temperature of $57.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6.93\%$. Based on these results then cooling *Axial* BLDC Motor Gesits is safe according to operating conditions.

Keywords : Heat Transfer, *Axial* BLDC Motor, GESITS, Forced Convection, Fin, CFD



Halaman ini sengaja dikosongkan



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan pada Tuhan Yang Maha Esa, karena kuasa-NYA tesis yang berjudul “Studi Numerik dan Eksperimen Pendinginan *Axial Brushless Direct Current* (BLDC) Motor untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik GESITS” dapat diselesaikan. Proses penulisan ini merupakan kesempatan bagi saya untuk mempelajari hal-hal baru yang belum didapatkan sebelumnya. Penyusunan tesis dilakukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik di Jurusan Teknik Mesin – ITS.

Tesis ini tidak akan selesai tanpa dukungan orang-orang baik disekitar saya tentunya. Banyak pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan proposal ini, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng dan Bapak Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST, selaku dosen pembimbing yang selalu siap sedia membimbing dan memberi arahan demi kesempurnaan tesis ini.
2. Bapak Dr.Ir. Budi Utomo Kukuh W,ME., Alief Wikarta, ST.,M.Sc.,Ph.D. dan Ary Bachtiar K P,ST.MT.Ph.D., selaku dosen penguji proposal dan sidang tesis yang memberikan saran dan masukan sehingga tesis ini semakin baik.
3. Orang tua, Mertua dan istri yang selalu memberikan do'a dan semangat demi keberhasilan saya.
4. Rekan-rekan PUI PT SKO (Pusat Unggulan IPTEK Perguruan Tinggi - Sistem Kontrol Otomotif) ITS yang bersedia menjadi teman diskusi, penghibur, selalu mendukung dan membantu baik secara moral maupun materi.
5. Rekan-rekan satu angkatan yang selalu mendukung dan membantu baik secara moral maupun materi.

Tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Sebab itu, saya berharap kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan-penulisan berikutnya.



Saya berharap tesis ini tidak hanya akan bermanfaat bagi pembacanya, tetapi juga bisa membawa manfaat baru bagi dunia teknologi. Terima kasih telah membaca tesis ini.

Surabaya, 02 Agustus 2017

Penulis



DAFTAR ISI

Judul dalam Bahasa Indonesia	i
Judul dalam Bahasa Inggris	iii
Halaman Pengesahan	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xv
Daftar Tabel	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian	4

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 <i>Axial</i> BLDC Motor GESITS <i>Existing</i>	5
2.2 <i>Literature Review</i> Pendinginan pada BLDC Motor	6
2.3 Dasar Teori Pendinginan BLDC Motor	10
2.3.1 <i>Heat Generation</i> pada BLDC Motor.....	10
2.3.2 Perpindahan Panas	12

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Numerik	17
3.1.1 Pre-Processing.....	18



3.2.2 Processing	24
3.2.3 Post Processing	27
3.2 Metode Eksperimen.....	27
3.2.1. Instalasi Penelitian.....	28
3.2.2. Peralatan Pendukung	29
3.2.3. Prosedur Pengambilan Data Eksperimen	32
3.3 Flowchart Penelitian	33
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Distribusi Temperatur <i>Axial BLDC Motor</i>	38
4.2 Validasi secara Kualitatif.....	41
4.3 Validasi secara Kuantitatif.....	43
4.4 Uji Pendinginan <i>Axial BLDC</i> Gesits	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	51
5.3 Penelitian Selanjutnya	52
DAFTAR PUSTAKA.....	53
Biografi Penulis	55
Lampiran Hasil Foto Menggunakan Camera Flir	57
Lampiran Pico Scope.....	62
Lampiran Hasil Residual	65
Lampiran Dokumentasi saat pengambilan data.....	67
Lampiran Spesifikasi Chassis Dynamometer Dynostar D70	68
Lampiran Spesifikasi Infrared Camera Flir T420.....	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 : Performa Motor Listrik saat Temperatur 25 °C dan 125 °C [6].....	1
Gambar 1.2 : Penambahan Kipas untuk Menghindari <i>Over Heat</i>	2
Gambar 2.1 : <i>Exploded Axial</i> BLDC Motor GESITS <i>Existing</i>	6
Gambar 2.2 : Temperatur Permukaan (a) hasil CFD (b) Thermal Motor Hasil Kamera pada Kerugian 61 Watt dengan Kecepatan Rotasi 350 rpm [4]	7
Gambar 2. 3 : Rata-rata <i>Heat Transfer Coefficient</i> pada Part Motor terhadap Kecepatan Rotasi Motor dengan Temperatur 50 °C	8
Gambar 2. 4 : Hasil CFD BLDC PM1.2 KW (Kuria, James. 2011).....	9
Gambar 2. 5 : Hasil Simulasi CFD [2].....	10
Gambar 2. 6 : <i>Core Loss</i> pada Motor Listrik	12
Gambar 2. 7 : <i>Thermal Boundary Layer</i> pada <i>Isothermal</i> Plat Datar.....	13
Gambar 3. 1 : Prosedur Simulasi Menggunakan <i>Fluent</i>	17
Gambar 3.2 : Objek Penelitian Pada Sepeda GESITS	18
Gambar 3.3 : Simplifikasi Model.....	19
Gambar 3.4 : Geometri <i>Axial</i> BLDC Motor GESITS	20
Gambar 3.5 : <i>Mesh Axial</i> BLDC Motor	21
Gambar 3.6 : Potongan <i>Axial</i> BLDC Motor GESITS	22
Gambar 3.7 : Tahanan Thermal <i>Axial</i> BLDC Motor	23
Gambar 3. 8 : Contoh Pengaturan <i>Boundary Condition</i>	25
Gambar 3. 9 : <i>Solution Control</i>	27
Gambar 3. 10 : Pengujian Menggunakan <i>Chassis Dynamometer</i>	28
Gambar 3.11 : Posisi Pemasangan Sensor Thermistor.....	29
Gambar 3. 12 : <i>Chassis Dynamometer Dynostar D70</i>	29
Gambar 3. 13 : Infrared Camera Flir 420.....	30
Gambar 3. 14 : DAQ Pro 5300 dan Thermocouple	31
Gambar 3. 15 : Digital Multimeter.....	32



Gambar 3. 16 : Flowchart Penelitian	33
Gambar 3.17 : Flow Chart Metode Numerik.....	34
Gambar 3.18 : Flowchart Metode Eksperimen.....	35
Gambar 4. 1 : Distribusi Temperatur Surface $X=0$ pada Putaran 1500 rpm	38
Gambar 4.2 : Distribusi Temperatur pada $Y=0, Z=0$ saat Putaran 1500 rpm	39
Gambar 4. 3 : Distribusi Kecepatan Aliran pada Putaran 1500 rpm dengan Inlet Velocity 9.17 m/s.....	40
Gambar 4.4 : Distribusi Temperatur dengan Putaran 1500 rpm Hasil Numerik dan Eksperimen	42
Gambar 4.5 : Data Temperatur BLDC Motor Hasil Eksperimen.....	44
Gambar 4. 6 : Data Temperatur Hasil Eksperimen dengan Lama Pengukuran Diperpanjang	45
Gambar 4.7 : Perbandingan Data Hasil Numerik dan Eksperimen	45
Gambar 4.8 : Distribusi Temperatur pada Winding saat Kecepatan 100 km/jam.	47
Gambar 4.9 : Distribusi Temperatur pada $X=0, Z=90$ saat Putaran 5000 rpm	47
Gambar 4. 10 : Distribusi Temperatur pada $X=0, Z=76$ saat Putaran 5000rpm ...	48
Gambar 4.11 : Distribusi Temperatur pada Rotor saat Kecepatan 100 kph	48
Gambar 4.12 : Distribusi Temperatur pada Heatsink saat Kecepatan 100kph	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Properties Axial</i> BLDC Motor GESITS	5
Tabel 2. 2 : <i>Losses</i> pada BLDC PM 1.2 KW (Kuria, James. 2011).....	9
Tabel 3.1 : <i>Boundary Region Name</i>	22
Tabel 3. 2 : <i>Material</i> yang Digunakan	24
Tabel 3.3 : <i>Properties Materials</i>	25
Tabel 3. 4 : <i>Boundary Condition</i> Simulasi CFD	26
Tabel 3. 5 : Variabel Penelitian pada Tesis.....	28
Tabel 4. 1 : <i>Heat Generation</i> pada Axial BLDC Motor yang Digunakan	38



Halaman ini sengaja dikosongkan

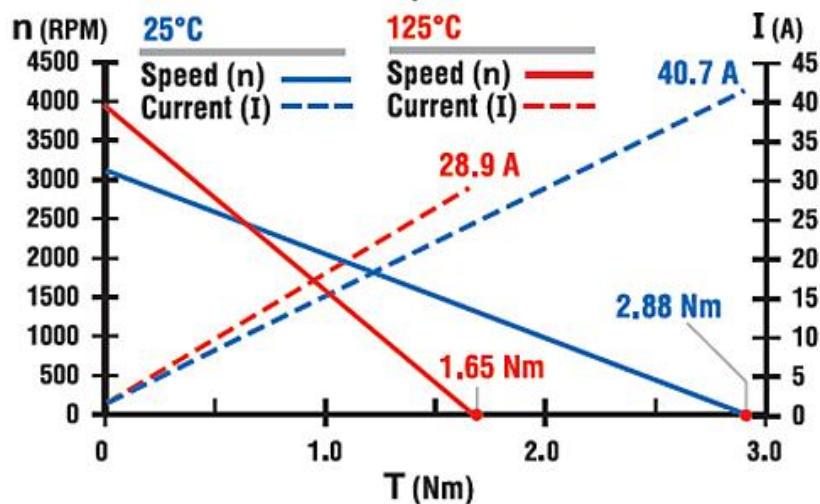


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pendinginan pada komponen utama merupakan aspek penting dalam menjaga ketahanan kerja dari komponen tersebut. Setiap komponen yang beroperasi akan menghasilkan losses berupa panas, termasuk pada *Brushless Direct Current* (BLDC) Motor. Apabila panas tersebut tidak dibuang maka akan mempengaruhi performa BLDC Motor tersebut, bahkan apabila ini dibiarkan secara terus menerus maka temperatur akan meningkat dan terjadi *Overheat*. *Overheat* pada motor listrik menimbulkan efek yang merugikan seperti degradasi isolasi kumparan, demagnetisasi, meningkatkan heat loss, penurunan efisiensi motor dan mengurangi life time motor listrik [2]. Temperatur motor listrik dapat mempengaruhi performa motor, sesuai pada grafik berikut :



Gambar 1.1 : Performa Motor Listrik saat Temperatur 25 °C dan 125 °C [6]

Gambar 1.1 merupakan perbandingan performa Motor dengan variasi temperatur. Untuk menghasilkan torsi yang sama yaitu 1.65 Nm, Motor bertemperatur 125 °C memerlukan arus listrik yang lebih besar dibandingkan dengan Motor bertemperatur 25 °C. *Peak Power* Motor bertemperatur 125 °C terjadi pada torsi 1.65 Nm sedangkan *Peak Power* Motor bertemperatur 25 °C berada pada Torsi 2.88 Nm. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur



Motor dapat menurunkan performa dari Motor Listrik tersebut. Agar *Axial* BLDC Motor GESITS memiliki performa yang optimal maka diperlukan pendinginan yang sesuai.

GESITS berkepanjangan Garansindo Electric Scooter ITS merupakan sepeda dengan penggerak Motor Listrik hasil kolaborasi PT Garansindo Technologies dengan ITS. GESITS telah melakukan uji jalan dari Jakarta sampai Bali pada tanggal 7-12 November 2016 dengan menggunakan BLDC Motor ini. BLDC Motor yang digunakan GESITS mengalami *Over Heat* setelah menempuh jarak 30 km di daerah Bekasi. Akhirnya untuk menambah pendinginan pada BLDC Motor dipasang kipas eksternal. Pengalaman tersebut menunjukkan pentingnya pendinginan untuk menjaga ketahanan BLDC Motor.



Gambar 1.2 : Penambahan Kipas untuk Menghindari *Over Heat*

Penambahan kipas seperti Gambar 1.2 pada dasarnya menambah pendinginan fin dengan *Forced Convection*. Penambahan kipas ini dilakukan dengan kondisi darurat sehingga efektif untuk dilakukan, namun pada kondisi saat ini perlu didesain pendinginan secara tepat. Banyak metode pendinginan yang dapat dilakukan, namun perlu disesuaikan dengan desain sepeda GESITS. Berangkat dari masalah tersebut maka perlu didesain pendinginan yang sesuai untuk *Axial* BLDC Motor GESITS ini.



Fasil, Muhammed [4] memodelkan perpindahan panas secara konveksi pada Hub Motor dengan menggunakan model thermal *Lumped Parameter* (LP) divalidasi dengan *Finite Element* (FE) dan data eksperimental sedangkan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) digunakan untuk permodelan aliran pada internal dan eksternal hub motor. Akhirnya, studi optimalisasi motor hub dilakukan dengan menggunakan model CFD untuk meningkatkan perpindahan panas. Serangkaian proses ini akan dilakukan pada thesis ini namun dengan perpindahan panas secara konduksi karena tipe motor menggunakan *Axial* BLDC. Thesis ini menggunakan simulasi Fluent 6.3 untuk mengetahui distribusi temperatur pada *Heatsink*. Selanjutnya akan dilakukan analisa desain *Axial* BLDC Motor *existing* dan *re-design* untuk pendinginan yang sesuai.

1.2 Perumusan Masalah

Thesis ini fokus pada perancangan pendinginan BLDC Motor yang diaplikasikan pada sepeda GESITS dengan menggunakan CFD. Rumusan masalah dalam thesis ini adalah :

1. Bagaimanakah distribusi temperatur pada *Axial* BLDC Motor yang saat ini dipakai sepeda motor GESITS menggunakan metode numerik?
2. Bagaimana metode eksperimen yang dapat digunakan untuk memvalidasi distribusi temperatur hasil simulasi CFD?
3. Apakah pendinginan pada *Axial* BLDC Motor Gesits saat ini sudah cukup sesuai dengan spesifikasi Gesits?

1.3 Batasan Masalah

Agar tesis ini sesuai dengan tujuan maka diperlukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Pendinginan dikatakan cukup apabila kenaikan temperatur tidak melebihi temperatur kerja kawat kumparan BLDC Motor (125 – 155 °C).
2. Fin menggunakan material aluminium seri 7075 T6 dengan konduktivitas thermal sebesar 202.4 W/mK.



3. BLDC Motor ini diaplikasikan pada sepeda GESITS dengan kecepatan 100 km/jam .
4. Simulasi dilakukan dalam kondisi *Steady* dan *Incompressible Flow*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan studi numerik dan perancangan pendinginan *Axial* BLDC Motor GESITS ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui distribusi temperatur pada desain pendinginan yang saat ini dipakai sepeda motor GESITS.
2. Menggunakan metode eksperimen yang dapat digunakan untuk memvalidasi distribusi temperatur hasil simulasi CFD.
3. Mengetahui apakah pendinginan pada *Axial* BLDC Motor Gesits saat ini sudah cukup sesuai dengan spesifikasi Gesits.

1.5 Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh pada saat dan atau setelah studi numerik dan perancangan pendinginan *Axial* BLDC Motor GESITS ini dilakukan adalah :

1. Sisi Ekonomi

Desain pendingin yang dihasilkan dapat meningkatkan performa *Axial* BLDC Motor ini, sehingga motor ini akan lebih ekonomis dan dapat bersaing dengan BLDC Motor lainnya.

2. Sisi Iptek

Desain pendinginan *Axial* BLDC Motor yang sesuai dengan aplikasi GESITS diharapkan diperoleh melalui penelitian ini, sehingga motor ini dapat lebih handal dan tangguh.

3. Sisi Manfaat Masyarakat

Penelitian ini dapat mendorong dan mempercepat perkembangan GESITS, sehingga dapat segera diproduksi massal. Dengan demikian masyarakat akan bangga dengan memakai produk sendiri.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

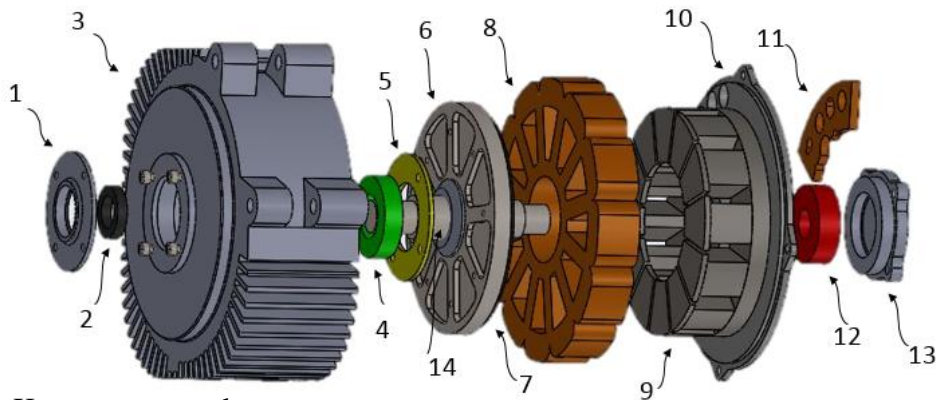
2.1 *Axial* BLDC Motor GESITS *Existing*

Perbedaan *Axial* BLDC Motor dengan motor radial yaitu dengan daya yang sama, *Axial* motor akan memiliki dimensi yang lebih kecil, bobot yang lebih ringan, torsi yang lebih besar dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor radial. Hal ini disebabkan luasan penampang kumparan dan magnet pada motor *Axial* 25% lebih besar dibandingkan dengan motor radial. Sehingga GESITS menggunakan desain *Axial* BLDC Motor ini. Berikut ini merupakan properties *Axial* BLDC Motor GESITS yang dapat digunakan sebagai acuan perhitungan :

Tabel 2.1 *Properties Axial* BLDC Motor GESITS

Parameter	Nilai
Rated Power	5 kW
Rated Speed	4000 rpm
Voltage	60 – 120 VDC
Effisiensi	> 90 %
Jumlah slot kumparan	12 slot
Jumlah pole magnet	4
Permanen Magnet	NdFeB (N52)
Torsi	28 Nm
Panjang gap stator dan rotor	2 mm
Jumlah <i>Phase</i>	3 <i>Phase</i>

Komponen penyusun *Axial* BLDC Motor GESITS dapat dilihat pada gambar berikut :



Keterangan gambar :

- | | |
|---|---------------------|
| 1. Rumah Seal | 8. Winding |
| 2. Seal | 9. Core |
| 3. Heatsink (<i>Extended Surface</i>) | 10. Cover Casing |
| 4. Bearing | 11. Isolator Kabel |
| 5. Bearing Stoper | 12. Bearing |
| 6. Piringan rotor | 13. Penutup Bearing |
| 7. Magnet | 14. Poros Rotor |

Gambar 2.1 : Exploded Axial BLDC Motor GESITS Existing

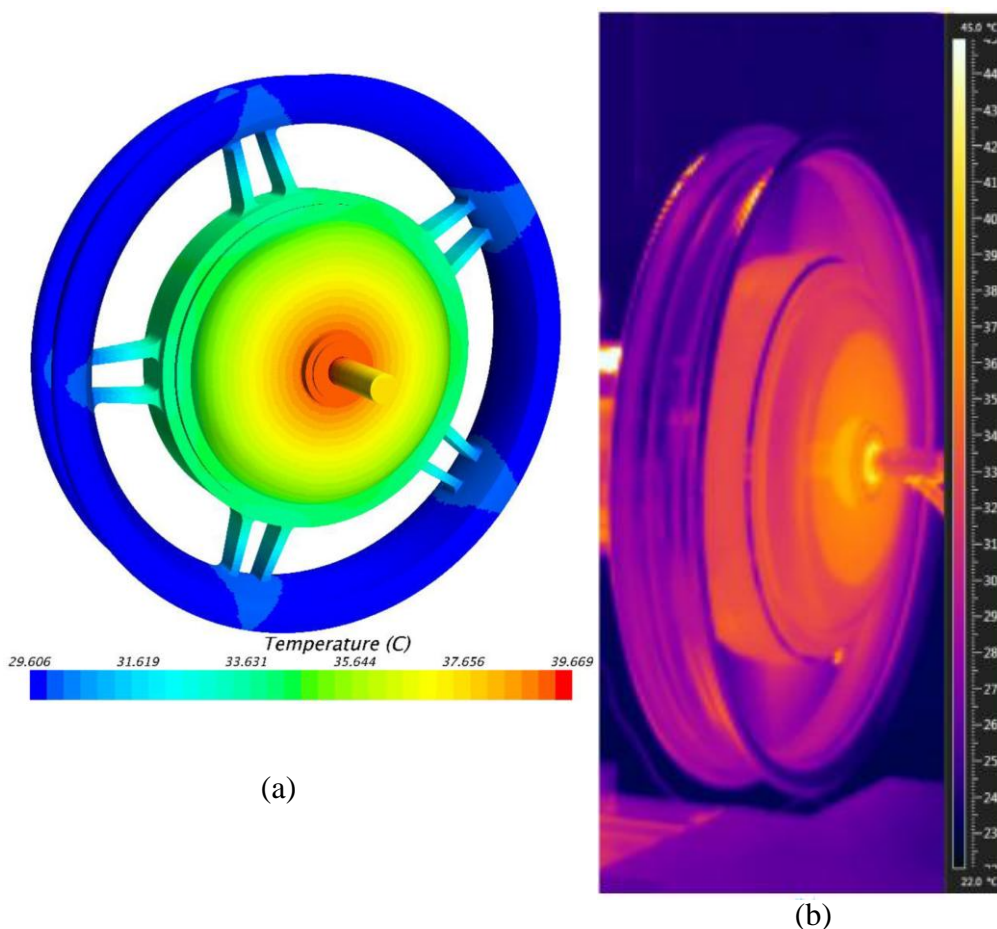
Gambar 2.1 merupakan komponen-komponen penyusun dari motor listrik *Axial*. *casing* (3) dan *cover casing* (10) merupakan bagian untuk melindungi motor dari benturan dan sebagai media pendingin. Material terbuat dari aluminium dural seri 7075T6. Komponen utama dari motor listrik adalah stator (9) dan rotor (6). Stator berjumlah 12 kutub terbuat dari material *Electric steel*, setiap kutub diberi kumparan kawat (8) menggunakan *Enameled wire* diameter 0.8 mm disusun parallel 12 *strand* dan 5 *turn*. Selanjutnya rotor terdiri dari poros (14), rumah magnet (6) dan magnet (7). Magnet menggunakan tipe N52 sebanyak 8 pcs dengan konfigurasi 4 kutub utara dan 4 kutub selatan.

2.2 Literature Review Pendinginan pada BLDC Motor

Fasil, Muhammed [4] meneliti pendinginan pada Hub Motor Listrik dengan menggunakan *Lumped Parameter* (LP), *Finite Element* (FE) dan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Hub BLDC Motor memiliki konstruksi yang berbeda dengan *Axial* BLDC motor GESITS. Panas yang dihasilkan oleh stator didistribusikan melalui konduksi hanya pada poros yang bukan merupakan



pendingin utama. Pendinginan utama dilakukan pada bagian *casing rotor (hub)* sehingga perpindahan panas secara Konveksi merupakan peran utama dalam pendinginan hub motor. Penelitian ini memodelkan perpindahan panas secara konveksi menggunakan model thermal LP divalidasi dengan FE dan data eksperimental sedangkan CFD digunakan untuk permodelan aliran pada internal dan eksternal hub motor. Akhirnya, studi optimalisasi motor hub telah dilakukan dengan menggunakan model CFD untuk meningkatkan perpindahan panas dari stator. Metode FE dapat memodelkan bentuk yang lebih kompleks sehingga lebih akurat dibandingkan dengan model thermal LP. Berikut distribusi temperatur dari hub BLDC Motor



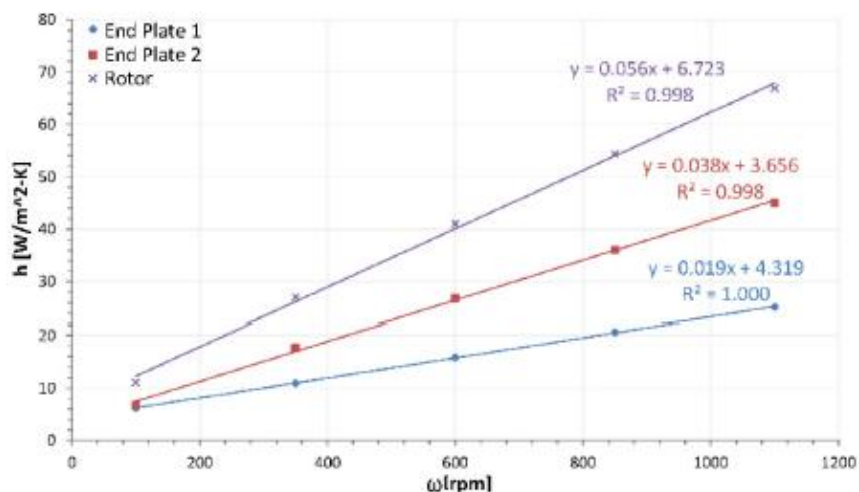
Gambar 2.2 : Temperatur Permukaan (a) hasil CFD (b) Thermal Motor Hasil Kamera pada Kerugian 61 Watt dengan Kecepatan Rotasi 350 rpm [4]

Perbandingan CFD dan potret temperatur permukaan motor dengan kerugian 61 W ditunjukkan pada Gambar 2.2. Distribusi temperatur bervariasi secara radial di permukaan. Suhu maksimum terjadi dekat dengan pusat, terutama di bearing.



Akurasi kamera thermal sebesar $\pm 2^\circ \text{C}$. Hasil ini membuktikan korelasi yang baik antara CFD dan eksperimen untuk suhu eksternal. Sehingga hasil CFD dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya dari motor listrik. Selanjutnya dilakukan modifikasi untuk memperoleh distribusi temperatur yang diinginkan. Metode ini yang akan dilakukan peneliti untuk menganalisis distribusi temperatur pada *Axial* BLDC Motor *existing*, kemudian hasilnya dibandingkan dengan eksperimental melalui potret kamera thermal. Apabila diperoleh hasil yang identik, hasil simulasi digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur dari desain *Axial* BLDC Motor yang diperbaharui untuk memperoleh pendinginan yang sesuai.

Koefisien perpindahan panas dihitung pada masing-masing kecepatan dan komponen motor. Komponen eksternal motor hub dinamakan sebagai plat akhir1 (ujung dengan drum rem), ujung pelat2 (ujung tanpa rem drum) dan rotor (komponen lainnya termasuk pelek dan hub). Kecepatan rotasi motor bervariasi dari 100 sampai 1100 rpm dengan interval 150 rpm dan hasilnya ditunjukkan pada gambar 2.3 sebagai koefisien perpindahan panas rata-rata untuk komponen yang berbeda.



Gambar 2. 3 : Rata-rata *Heat Transfer Coefficient* pada Part Motor terhadap Kecepatan Rotasi Motor dengan Temperatur 50°C

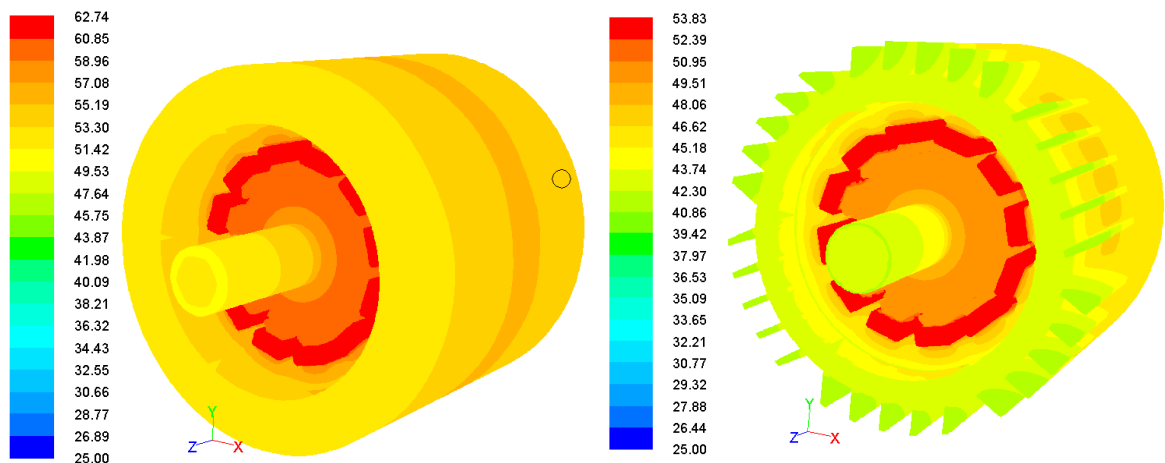


Kuria, James pada tahun 2011 melakukan studi numerik pada BLDC Permanent Magnet Motor 1.2 KW. *Electromagnetic losses* seperti *coreloss* dan *copper losses* diperoleh dengan simulasi MAXWELL, sedangkan *losses* akibat friksi bearing dihitung. Berikut nilai *losses* pada masing-masing komponen :

Tabel 2. 2 : *Losses* pada BLDC PM 1.2 KW (Kuria, James. 2011)

Loss	Value (Watt)
<i>Coreloss</i>	150 W
<i>Copper Losses</i>	50 W
<i>Bearing Friction Loss</i>	12 W

Berikut hasil simulasi yang diperoleh :

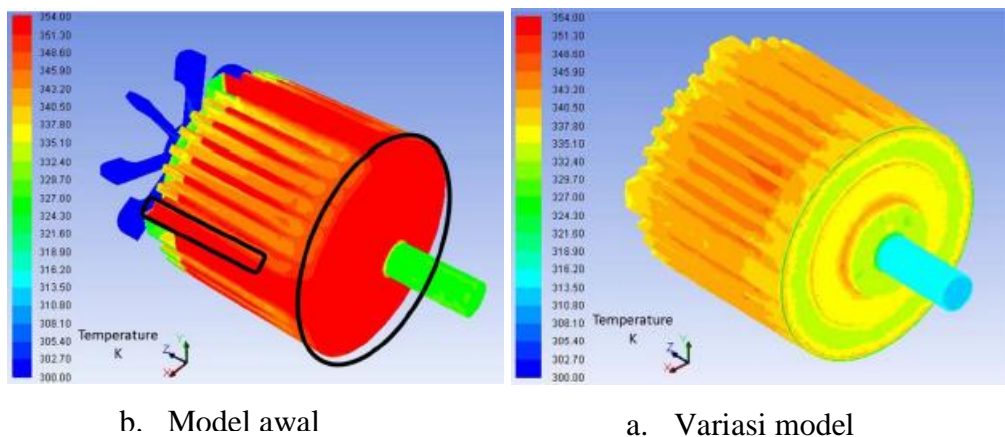


Gambar 2. 4 : Hasil CFD BLDC PM1.2 KW (Kuria, James. 2011)

Kuria, James memodifikasi BLDC Motor dengan memberikan penambahan fin pada *housing motor*. Penambahan dilakukan dengan 3 variasi dimensi fin. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, dengan penambahan fin tersebut maka perpindahan panas yang terjadi dapat meningkat serta dapat menurunkan temperatur pada winding hingga 15%. Orientasi fin juga diamati, namun pengaruhnya tidak terlalu signifikan hanya mempersulit proses produksi.



Vu, Duc Thuan pada tahun 2013 melakukan penelitian untuk menganalisis pendinginan pada BLDC Motor 1.2 KW menggunakan CFD. Penelitian ini bervariasi 3 model bentuk BLDC sehingga menghasilkan distribusi temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan model awal. Penelitian ini menggunakan ANSYS ICEM CFD dengan tipe *meshing Tetrahedral* dan *boundary condition*-nya meliputi *inlet velocity*, *pressure outlet* sebagai *pressure boundary condition* yang di-set sebagai tekanan atmosfer. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.5 : Hasil Simulasi CFD [2]

Model asli LDC Motor memiliki temperatur permukaan *housing* sebesar 345.2 K pada 15000 rpm. Variasi menggunakan *guide* aliran udara pada *casing* sehingga aliran dapat tersebar merata terutama pada penutup depan motor. Metode ini dapat menurunkan temperatur permukaan sebesar 2.14K. Distribusi temperatur yang dihasilkan pada simulasi dengan variasi menunjukkan pendinginan yang terjadi lebih efisien dibandingkan dengan model aslinya.

2.3 Dasar Teori Pendinginan BLDC Motor

2.3.1 Heat Generation pada BLDC Motor

Kerugian yang terjadi pada Motor Listrik dapat dikelompokkan sebagai berikut :



A. Resistive Losses

Kerugian resistif umumnya komponen utama dari rugi daya di PMBLDC motor dan dihitung sebagai :

$$P_r = m I_{ph}^2 R_{ph}$$

di mana m adalah jumlah fase, I_{ph}^2 adalah RMS fase saat ini dan R_{ph} adalah resistansi hambatan. Resistansi bervariasi dengan suhu dan dapat dihitung dari resistensi pada suhu lain sebagai

B. Loss per unit Mass due to Hysteresis (P_h)

Stator inti terbuat dari laminasi terisolasi baja silikon. Oleh karena itu, variasi fluks magnetik karena rotasi magnet menghasilkan *Eddy losses* dan *Hysteresis losses* di laminasi. Kerugian ini diperkirakan secara individual untuk stator gigi yoke sebagai variasi medan di dalamnya yang berbeda. Hilangnya massa per satuan karena *hysteresis*, *eddy current* di yoke stator dan *eddy current* di tooth stator dihitung sebagai

$$P_h = K_h f^\alpha B_m^\beta$$

dimana f adalah frekuensi variasi fluks, B_m adalah densitas puncak fluks, K_h , K_e , α , β adalah kurva konstanta fit dihitung dari data hilangnya laminasi.

C. Losses Eddy Current pada Stator Yoke (P_{ey})

Untuk menghitung *losses eddy current* pada stator yoke dapat menggunakan persamaan berikut :

$$P_{ey} = K_e \frac{8 f^2 B_m^2}{\pi \beta_m}$$

dimana f adalah frekuensi variasi fluks, B_m adalah densitas puncak fluks, β_m adalah busur gigi dan tiang lebar masing-masing dalam radian listrik, K_e adalah kurva konstanta fit dihitung dari data hilangnya laminasi.



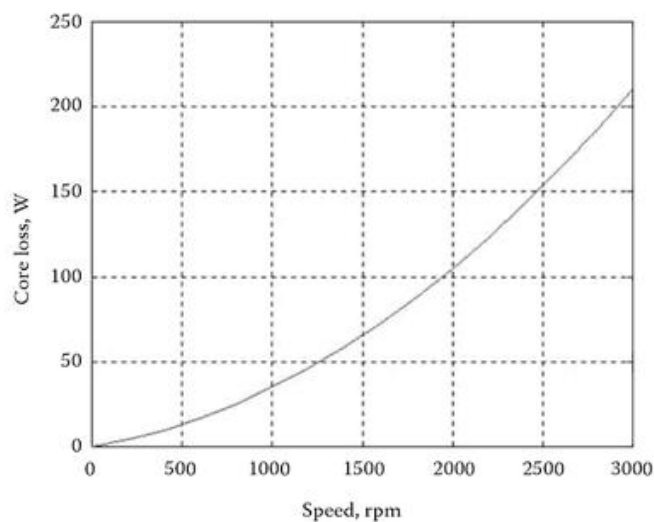
D. Losses Eddy Current pada Stator Tooth (P_{et})

Untuk menghitung *losses eddy current* pada *tooth stator* dapat menggunakan persamaan berikut :

$$P_{et} = K_e \frac{4}{\pi} \frac{f^2 B_m^2}{\alpha_{tt}} \left[2 - \frac{\pi - \beta_m}{\alpha_{tt}} \right]$$

dimana f adalah frekuensi variasi fluks, B_m adalah densitas puncak fluks, α_{tt} dan β_m adalah busur gigi dan tiang lebar masing-masing dalam radian listrik, K_h , K_e , α , β adalah kurva konstanta fit dihitung dari data hilangnya laminasi.

Core loss terhadap *speed* pada BLDC motor dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. 6 : Core Loss pada Motor Listrik

2.3.2 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah mekanisme perpindahan energi yang disebabkan perbedaan temperatur baik pada suatu media atau antarmedia. Energi panas berpindah dengan tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Berikut ini merupakan penjelasan metode perpindahan panas yang terjadi :

A. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas yang terjadi pada media yang memiliki perbedaan temperatur dan mekanisme secara fisiknya adalah aktivitas antara



molekul yang lebih aktif ke molekul yang kurang aktif. Model matematik dari perpindahan panas secara konduksi ini menurut *Fourier* adalah sebagai berikut:

$$q''_{cond} = -k \frac{dT}{dx}$$

dengan :

q'' : Heat Flux, W/m²

k : Konduktivitas panas, W/mK

dT : Beda temperatur, K

dx : Beda jarak, m

Tanda minus digunakan karena perpindahan panas selalu terjadi ke arah temperatur yang lebih rendah.

B. Konveksi

Konveksi merupakan bentuk perpindahan panas yang disertai perpindahan materi. Umumnya terjadi pada benda cair dan gas. Secara matematis besarnya perpindahan panas konveksi dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$q''_{conv} = h_c(T_s - T_f)$$

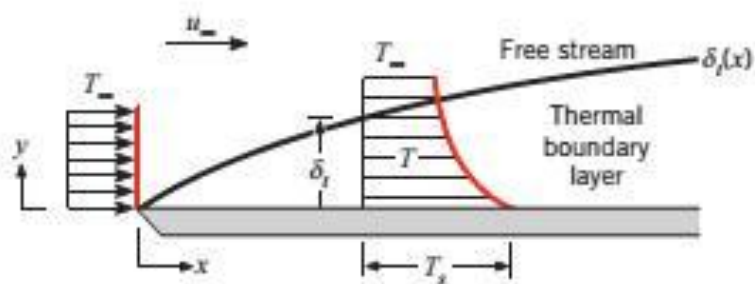
dengan :

q'' : Heat Flux, W/m²

h : Koefisien konveksi, W/m²K

T_s : Temperatur permukaan, K

T_f : Temperatur fluida, K



Gambar 2.7 : Thermal Boundary Layer pada Isothermal Plat Datar



Konveksi merupakan bentuk perpindahan panas dimana molekul-molekul benda membawa energi panas dari satu titik ke titik lainnya. Umumnya terjadi pada benda cair dan gas. Aliran konveksi dipengaruhi beberapa faktor :

- Aliran horizontal dan vertikal
- Aliran laminar atau turbulen
- Permukaan rata atau melengkung
- Jenis fluidanya, zat cair atau gas
- Sifat-sifat fluida seperti viskositas, kalor jenis, dsb

Perpindahan panas konveksi dapat dibagi menjadi dua:

➤ *Forced Convection*

Yaitu perpindahan panas karena adanya faktor kerja dari luar terhadap fluida perantara, misalnya konveksi dengan adanya bantuan *Fan*, *Blower*, *Air Conditioner* dan sebagainya.

➤ *Free Convection*

Yaitu perpindahan panas tanpa ada faktor luar melainkan karena *Buoyancy Force*. Secara umum, besarnya laju perpindahan panas konveksi dapat dirumuskan:

$$q'' = h (T_{\infty} - T_s), \quad T_s > T_{\infty}$$

dengan :

h = Koefisien perpindahan panas secara konveksi ($\text{W/m}^2\text{K}$)

q'' = *Convection Heat Flux* (W/m^2)

C. Radiasi

Radiasi merupakan cara perpindahan energi panas dengan gelombang elektromagnetik dari suatu permukaan benda ke lingkungannya tanpa memerlukan media penghantar. Model matematik dari perpindahan panas secara radiasi ini adalah sebagai berikut:



$$q''_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

dengan :

q'' : Heat Flux, W/m^2

σ : Konstanta Stefan-Boltzman, $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

ϵ : Emisivitas bahan

h_r : Koefisien perpindahan panas radiasi, W/m^2K

T_s : Temperatur permukaan, K

T_{sur} : Temperatur lingkungan, K

Untuk benda hitam sempurna atau *black body* mempunyai nilai $e=1$, karena benda hitam merupakan pemancar dan penyerap panas yang baik. Sedangkan permukaan yang mengkilap termasuk pemancar dan penyerap panas yang buruk memiliki nilai $e=0$.



Halaman ini sengaja dikosongkan



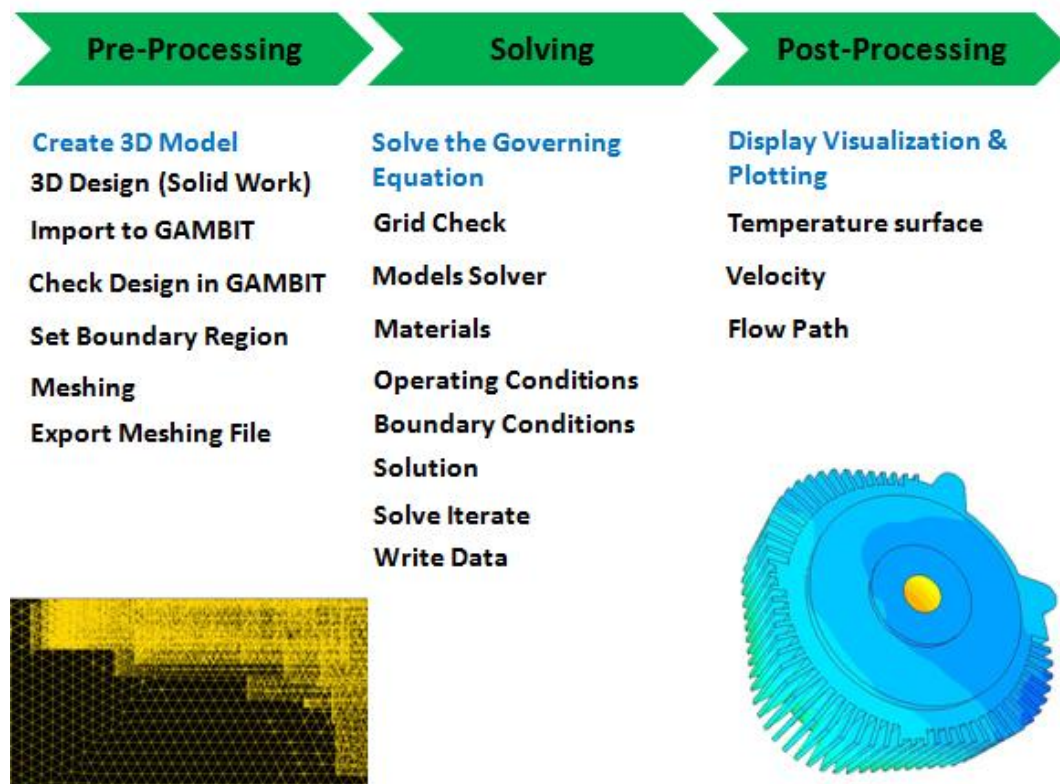
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu metode numerik dan metode eksperimen. Metode eksperimen digunakan untuk validasi hasil numerik. Hasil simulasi yang telah divalidasi digunakan untuk menganalisa dan membuat desain baru pendinginan *Axial* BLDC Motor GESITS yang sesuai dengan kebutuhan.

3.1 Metode Numerik

Penelitian numerik dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan *software* Fluent 6.3.26 dan dengan *software* GAMBIT 2.4.6 untuk melakukan *meshing* pada model tersebut. Secara garis besar metode numerik yang dilakukan sesuai pada gambar berikut :



Gambar 3. 1 : Prosedur Simulasi Menggunakan *Fluent*



Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik ini adalah sebagai berikut :

3.1.1 Pre-Processing

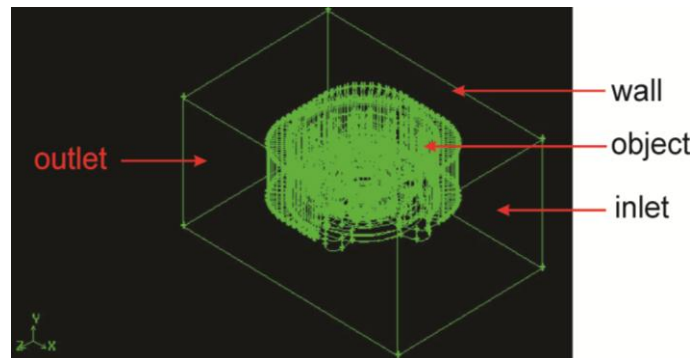
A. Desain 3D *Axial* BLDC Motor pada GESITS dan Simplifikasi Model

Keseluruhan *geometry Axial* BLDC Motor GESITS digambar pada Solidwork Premium 2016 x64 Edition SP 4.0. *Software* CAD ini memudahkan designer dalam menggambar desain karena dilengkapi dengan berbagai fitur. Menggambar menggunakan Solidwork lebih mudah apabila dibandingkan menggambar langsung pada Gambit. Gambar 3.2 dapat digunakan untuk memudahkan pemahaman dalam memodelkan pendinginan pada *Axial* BLDC Motor.



Gambar 3.2 : Objek Penelitian Pada Sepeda GESITS

Gambar 3.2 merupakan desain terbaru GESITS setelah direvisi berdasarkan evaluasi kegiatan Tour Jawa – Bali. Udara di sekitar *Axial* BLDC Motor diperlukan sirkulasi agar perpindahan panas melalui Fin dapat optimal. Pada prinsipnya pemakaian Fin digunakan untuk memperluas penampang (*contact*) dengan udara sekitar untuk memperbesar perpindahan panas yang terjadi, sehingga apabila fluida tidak tersirkulasi dengan baik maka kinerja Fin tidak optimal. *Body* GESITS digunakan untuk identitas tampilan sekaligus secara aerodinamis dapat menangkap udara dari depan dan mengarahkan pada *Axial* BLDC Motor sebagai sirkulasi pendinginan. Berdasarkan desain tersebut maka secara numerik pendinginan *Axial* BLDC dapat dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 3.3 : Simplifikasi Model

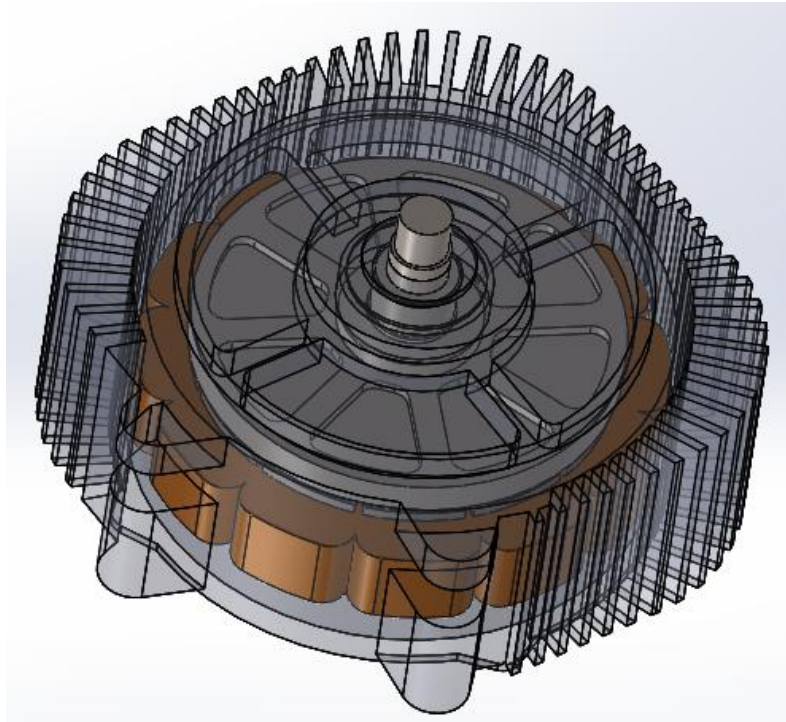
Gambar 3.3 merupakan model yang akan disimulasi dimana inlet merupakan pengganti kecepatan udara yang mengalir ke *Axial* BLDC Motor melalui desain *body* sebagai *guide*. *Wall* merupakan batasan aliran dari inlet, dinding ini dibuat sejauh mungkin dari benda uji hingga efek permukaan *wall* tidak mempengaruhi permukaan *Axial* BLDC Motor. Posisi *Axial* BLDC Motor dengan inlet juga disesuaikan dengan desain GESITS untuk memperoleh hasil yang lebih *valid*.

B. Penyederhanaan Geometri *Axial* BLDC Motor

Proses ini dilakukan untuk mempersiapkan model sebelum dilakukan meshing. Bagian-bagian motor yang secara signifikan tidak berpengaruh pada pendinginan diabaikan untuk mengurangi jumlah *meshing*, *surface* maupun jumlah *volume*. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada tahap ini adalah :

1. Fillet pada desain *Axial* BLDC Motor dapat diabaikan, sehingga dapat mempermudah *meshing*.
2. Baut sekaligus lubang baut diabaikan melalui menghapus baut dan menutup lubangnya dengan *surface* sesuai desain.
3. Dipastikan pada tahap ini bahwa desain part tidak beririsan dengan part lain serta apabila terdapat *surface* yang perlu kontak harus benar-benar terhubung (tidak ada celah).
4. Volume yang merupakan satu bagian part digabung (*group*) agar saat di-*import* ke Gambit tidak terdapat banyak *volume*.

Berikut ini merupakan hasil dari penyederhanaan desain yang dilakukan dalam tahap ini :

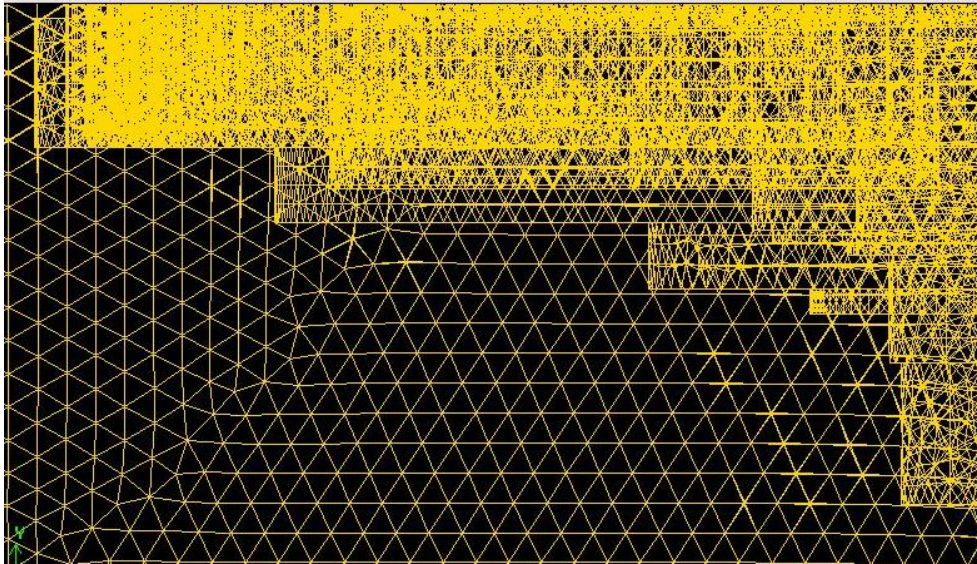


Gambar 3.4 : Geometri *Axial* BLDC Motor GESITS

Gambar 3D *Axial* BLDC Motor yang sudah disederhanakan, selanjutnya di-export dengan bentuk file STEP. Step file dapat dibaca Gambit untuk dilakukan tahap selanjutnya.

C. Membuat *Meshing*

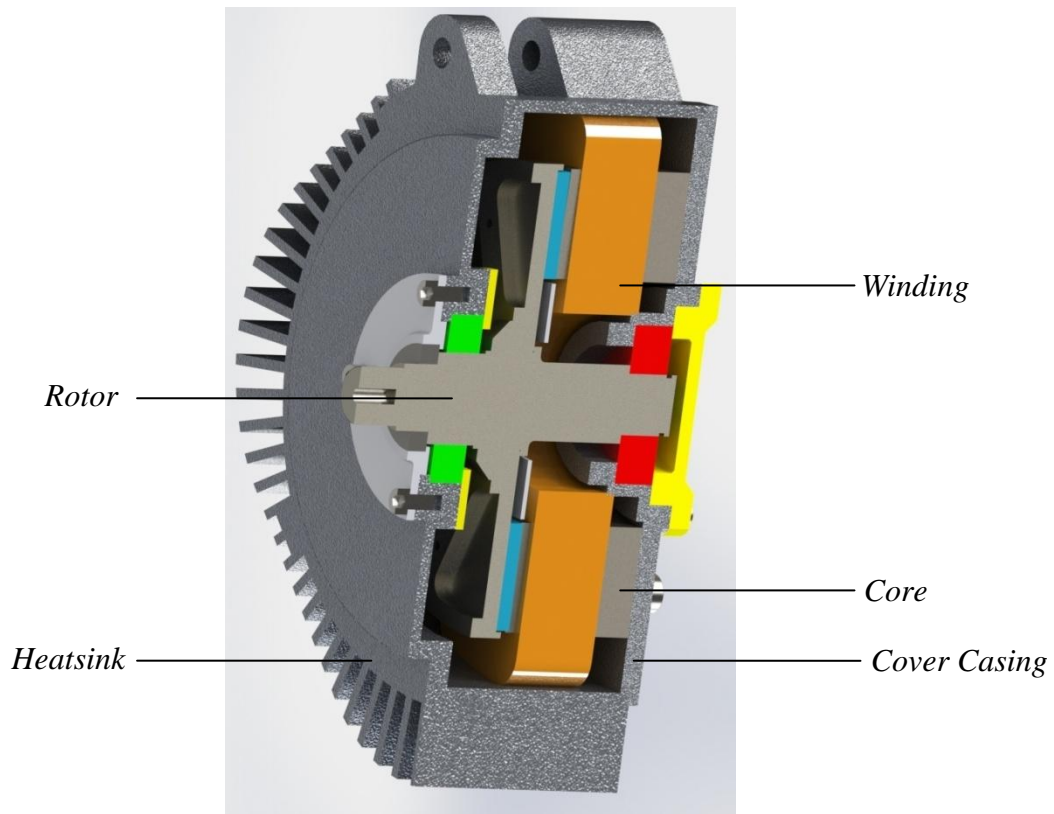
Tahapan selanjutnya adalah melakukan proses dengan *software* Gambit 2.4.6. *Meshing* adalah membagi model *solid* menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Kualitas dan kuantitas *mesh* yang digunakan sangat mempengaruhi proses penyelesaian simulasi. Model *solid* yang berhimpit dilakukan *split volume*. *Meshing* yang digunakan pada penelitian ini adalah *tetrahedral/hybrid* dengan total *mesh* 2.809.414.



Gambar 3.5 : Mesh Axial BLDC Motor

D. Mendefinisikan *Boundary Region*

Gambar 3.6 merupakan potongan *Axial BLDC Motor* GESITS, gambar ini dapat digunakan untuk membuat model sistem dari perpindahan panas yang terjadi sehingga dapat menentukan *Boundary Region* yang diperlukan. *Core* dan *Winding* merupakan sumber panas pada motor ini yang dapat disederhakan sebagai *Heat flux*. Perpindahan panas yang terjadi secara konduksi menuju *cover casing* dan secara konveksi menuju rotor melalui udara berjarak 2 mm. Perpindahan panas yang signifikan terjadi secara konduksi menuju *cover casing* dan diteruskan ke *Heatsink (Extended Surface)*. Sambungan antara *Core* dengan *Cover Casing* menggunakan *Silicone Thermal Grease* dengan konduktifitas thermal 3.6 W/mK setebal 0.5 mm. Panas dari *Cover Casing* selanjutnya ditransfer ke *Heatsink* melalui proses konduksi. Selanjutnya pembuangan panas terjadi secara konveksi dan radiasi melalui fin pada *heatsink*.



Gambar 3.6 : Potongan Axial BLDC Motor GESITS

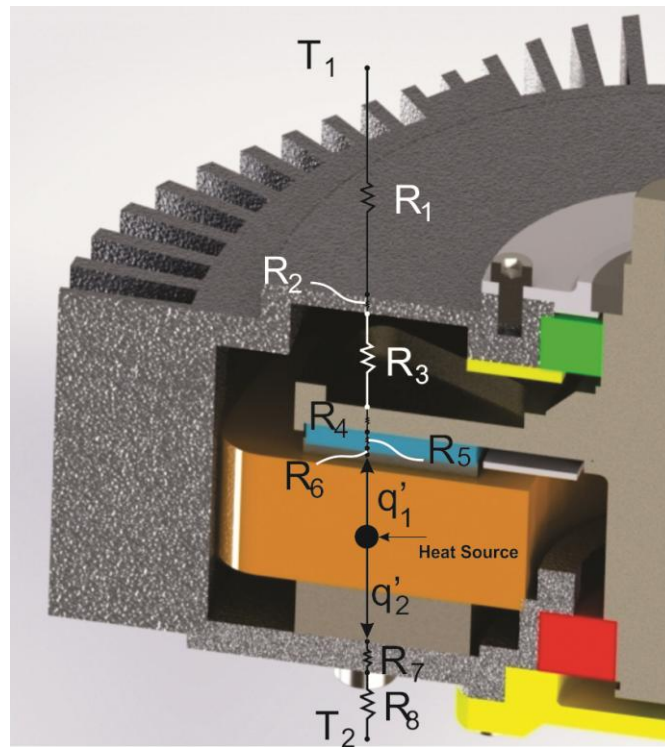
Berdasarkan gambar di atas maka dapat ditentukan *Boundary Region* sebagai berikut :

Tabel 3.1 : *Boundary Region Name*

<i>Specify Boundary Name</i>	<i>Type</i>	<i>Specify Continuum Name</i>	<i>Type</i>
<i>Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	<i>External_Fluid</i>	<i>Fluid</i>
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Out</i>	<i>Internal_Fluid</i>	<i>Fluid</i>
<i>Wall_Surrounding</i>	<i>Wall</i>	<i>Heatsink</i>	<i>Solid</i>
<i>Wall_Heatsink</i>	<i>Wall</i>	<i>Rotor</i>	<i>Solid</i>
<i>Wall_Rotor</i>	<i>Wall</i>	<i>Winding</i>	<i>Solid</i>
<i>Wall_Winding</i>	<i>Wall</i>	<i>Core</i>	<i>Solid</i>
<i>Wall_Core</i>	<i>Wall</i>		



Tahanan Thermal *Axial* BLDC Motor dapat dilihat pada penampang berikut :



Gambar 3.7 : Tahanan Thermal *Axial* BLDC Motor

Tahanan thermal yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 merupakan contoh tahanan satu arah. Secara aktual perpindahan panas akan terjadi secara 3D kesegala arah mengikuti perbedaan temperatur yang terjadi. Sumber panas pada *Axial* BLDC Motor ini adalah pada *winding* dan *core* dimana *Heatflux* (q_1' dan q_2') ditransfer baik keatas maupun kebawah. *Heatflux* yang ditransmisikan ke atas akan melalui konveksi dengan R6 dan Konduksi pada magnet dengan tahanan thermal R5 serta Rotor R4. Selanjutnya panas akan dipindahkan melalui konveksi dengan tahanan thermal R3 dan juga konduksi pada casing *Axial* BLDC Motor (R2) dan akhirnya akan ditansfer ke udara sekitar dengan tahanan thermal R1. *Heatflux* yang ditransmisikan ke bawah melalui R7 merupakan tahanan thermal pada perpindahan panas secara konduksi di *cover heatsink* yang akan diteruskan ke Pin Fin dan ke udara sekitar melalui konveksi dengan tahanan thermal R8. Tahanan thermal R1 dan R8 berubah terhadap aliran udara akibat kecepatan motor. Sedangkan R6 dan R3 berubah terhadap kecepatan putaran rotor (internal *Axial* BLDC Motor).



3.2.2 Processing

Pada tahap ini dilakukan proses simulasi berdasarkan hasil *meshing* dari geometri yang telah dibuat dengan menggunakan *software* FLUENT 6.3.26. Adapun proses yang dilakukan antara lain:

1. Grid

Langkah awal setelah masuk pada *software* Fluent dilakukan *read* untuk data hasil *eksport* GAMBIT. Kemudian dilakukan pengecekan *grid*. Setelah itu ditentukan skala. Pada penelitian ini menggunakan skala dalam mm.

1. Solver Models

Pemodelan ini menggunakan *solver* 3D dengan keakuratan tunggal. Pada thesis ini digunakan *solver segregated* untuk menyelesaikan persamaan tersebut secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain). *Solver* yang digunakan berbasis tekanan (*pressure based*). Pada sub menu *viscous*, dipilih model *k-ε Standar*. Pada sub menu *energy*, persamaan *energy* diaktifkan dalam mendukung penyelesaian *heat transfer* terhadap perubahan temperatur.

3. Materials

Dalam tahap ini dilakukan pengaturan jenis material sebagai berikut:

Tabel 3. 2 : Material yang Digunakan

<i>Name</i>	<i>Materials</i>
<i>Wall_Surrounding</i>	<i>Alumunium</i>
<i>Wall_Heatsink</i>	<i>Alumunium</i>
<i>Wall_Rotor</i>	<i>Steel</i>
<i>Wall_Winding</i>	<i>Copper</i>
<i>Wall_Core</i>	<i>Steel</i>
<i>External_Fluid</i>	<i>Air</i>
<i>Internal_Fluid</i>	<i>Air</i>
<i>Heatsink</i>	<i>Alumunium</i>
<i>Rotor</i>	<i>Steel</i>
<i>Winding</i>	<i>Copper</i>
<i>Core</i>	<i>Steel</i>



Tabel 3.3 : Properties Materials

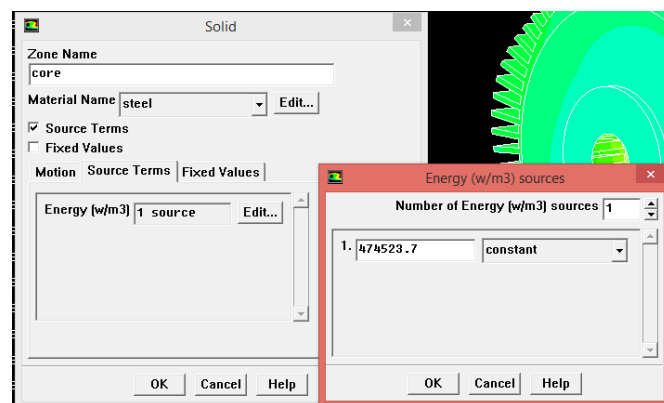
Components	Density, ρ (kg/m ³)	Thermal conductivity, k (W/m K)	Specific heat, C_p (J/kg K)
Fluid (air)	1.225	0.0242	1006.43
Magnet (ferrite magnet)	8030	16.27	502.48
Winding (copper)	8978	387.6	381
Heatsink (Aluminium)	2719	202.4	871

4. Operating Condition

Merupakan perkiraan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada daerah operasi yakni sebesar 1 atm (=101325 Pa).

5. Boundary Condition

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi baik pada objek penelitian maupun *inlet* dan *outlet*. Sumber panas pada *Axial BLDC Motor* adalah pada *Winding* yang akan diset *Boundary Condition*-nya sebagai *heat flux*. Perpindahan panas pada *Axial BLDC Motor* ini tergolong sebagai perpindahan panas *conjugate*. *Conjugate heat transfer* digunakan untuk menghitung perpindahan panas secara konduksi pada *solid material*, *coupled* dengan perpindahan panas secara konveksi. Berikut beberapa contoh pengaturan *Boundary Condition* :



Gambar 3. 8 : Contoh Pengaturan *Boundary Condition*



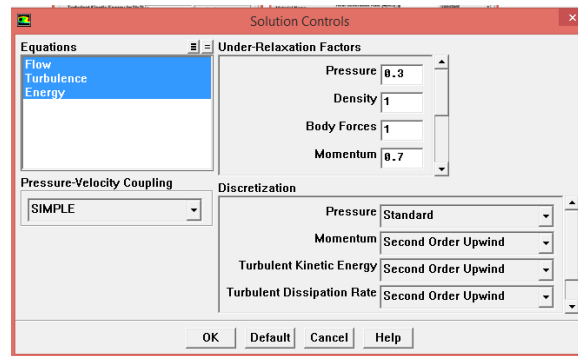
Boundary condition secara detail dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3. 4 : *Boundary Condition* Simulasi CFD

Zone	Type	Material Name	Remark
Core	Solid	Steel	Pada kolom <i>source term</i> dimasukkan <i>heat generation</i> sesuai dengan kecepatan masing-masing
External Flow	Fluid	Air	<i>Setting</i> sesuai dengan <i>default</i>
Heatsink	Solid	Aluminum	<i>Setting</i> sesuai dengan <i>default</i>
Inlet	Velocity inlet	-	<i>Velocity magnitude</i> diisi sesuai dengan variasi kecepatan dalam satuan m/s <i>Turbulent intensity</i> diisi 1 % <i>Turbulent viscosity ratio</i> 1
Internal Flow	Fluid	Air	<i>Setting</i> sesuai dengan <i>default</i>
Outlet	Outflow	-	<i>Setting</i> sesuai dengan <i>default</i>
Rotor	Solid	Steel	<i>Setting</i> sesuai dengan <i>default</i>
Wall	Wall	Aluminum	Pada kolom <i>Thermal</i> dipilih perpindahan panas <i>mixed</i> dengan nilai parameter sesuai dengan kondisi
Wall_Heatsink	Wall	Aluminum	Pada kolom <i>Thermal</i> dipilih perpindahan panas <i>coupled</i>
Wall_Rotor	Wall	Steel	Pada kolom <i>Thermal</i> dipilih perpindahan panas <i>coupled</i>
Wall_Winding	Wall	Copper	Pada kolom <i>Thermal</i> dipilih perpindahan panas <i>coupled</i>
Winding	Solid	Copper	Pada kolom <i>source term</i> dimasukkan <i>heat generation</i> sesuai dengan kecepatan masing-masing

6. Control dan Monitoring Solution

Solution control untuk metode *steady* yang digunakan adalah metode *pressure-velocity coupling* adalah SIMPLE dengan diskritisasi *standar* untuk *pressure* dan *second order upwind* untuk parameter lainnya. *Under relaxation factor* dapat dilihat pada Gambar 3. 9 berikut :



Gambar 3.9 : Solution Control

7. Initialize

Merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. *Initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

8. Iterate

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada Fluent 6.3.26. Pada *monitoring solutions* dilakukan pengaturan kriteria *residual* untuk parameter *energy* sebesar 10^{-6} , sedangkan parameter lain diatur tingkat konvergensinya sebesar 10^{-4} .

3.2.3 Post Processing

Merupakan penampilan hasil yang telah diperoleh. Dapat divisualisasikan melalui tampilan *grid display*, plot kontur (temperatur, kecepatan, dan sebagainya), plot *vector* dll sesuai dengan yang ingin digunakan pada analisis.

3.2 Metode Eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk validasi hasil simulasi yang telah dilakukan. Eksperimen menggunakan 1 unit GESITS dengan *Axial* BLDC 5 KW. Berikut tahapan eksperimen ini :



3.2.1. Instalasi Penelitian



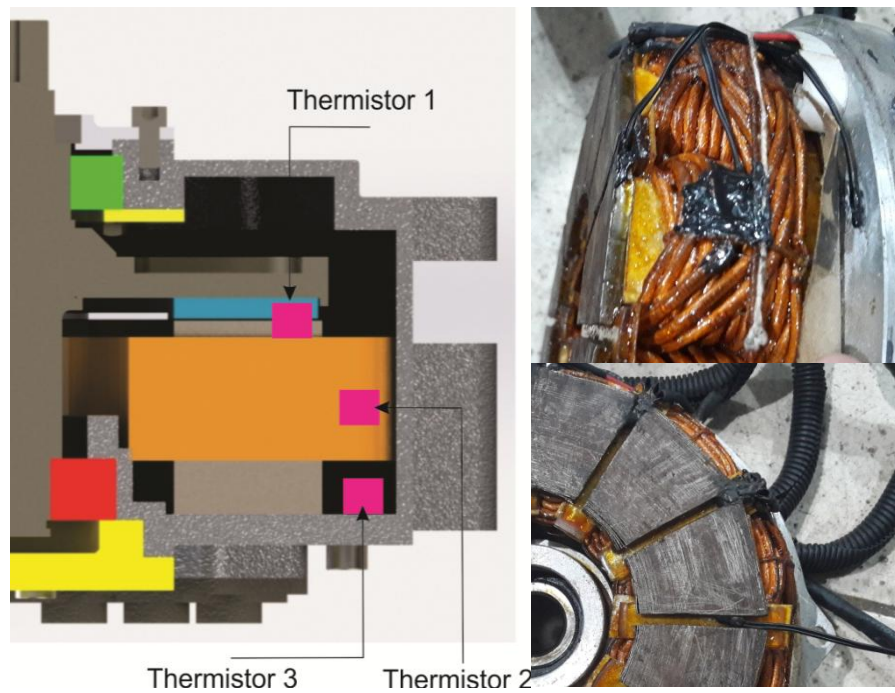
Gambar 3. 10 : Pengujian Menggunakan Chassis Dynamometer

Pengujian ini menggunakan *Chassis Dynamometer* untuk memberikan pembebanan pada sepeda motor listrik. Pada pengujian ini benda uji tidak bergerak secara translasi, padahal secara aktual apabila motor ini dijalankan maka *Axial* BLDC Motor akan terkena aliran fluida dari arah depan. Agar hasil eksperimen ini dapat mendekati kondisi sebenarnya maka dari depan Motor Listrik diberi kipas di depan sepeda motor tersebut. Berikut variabel yang akan digunakan pada eksperimen ini :

Tabel 3. 5 : Variabel Penelitian pada Tesis

Variabel Bebas	Putaran <i>Axial</i> BLDC Motor (1000, 1500, 2000, 2500, 3000 rpm) dengan kecepatan kipas tetap.
Variabel Terikat	Temperatur pada <i>winding</i> , temperatur pada <i>heatsink</i> , temperatur pada core, Distribusi temperatur eksternal <i>Axial</i> BLDC Motor dari berbagai sudut pandang, Arus Listrik, hambatan internal <i>Axial</i> BLDC Motor.
Variabel Terkontrol	<i>Axial</i> BLDC Motor dengan spesifikasi yang sama, Temperatur ruang, Tegangan Baterai, Controller

Sensor temperatur yang digunakan adalah Thermistor. Berikut posisi pemasangan sensor temperatur :



Gambar 3.11 : Posisi Pemasangan Sensor Thermistor

3.2.2. Peralatan Pendukung

Untuk menunjang eksperimen ini diperlukan alat sebagai berikut :

A. Chassis Dynamometer Dynostar D70



Gambar 3. 12 : Chassis Dynamometer Dynostar D70



Dynamometer ini biasanya digunakan untuk mengetahui performa dari motor konvensional sekaligus dapat digunakan untuk pembebanan sesuai kebutuhan. *Chassis Dynamometer* ini dapat *me-record* data kecepatan, rpm dan *torque* yang dihasilkan dari motor. Peneliti menggunakan alat ini karena di workshop tersedia fasilitas ini. Sebenarnya, secara ideal pengujian *Axial* BLDC Motor ini menggunakan Dinamometer tetapi karena alat ini belum tersedia maka dapat didekati dengan penggunaan *Chassis Dynamometer* D70 ini.

B. Infrared Camera Flir 420



Gambar 3. 13 : Infrared Camera Flir 420

Infrared Camera Flir 420 ini digunakan untuk memotret distribusi temperatur eksternal pada *Axial* BLDC Motor. Alat ini dapat mengukur temperatur dengan *range* pengukuran (-20°C to 650°C) dan memiliki sensitifitas $<0.045^{\circ}\text{C}$ pada 30°C . Spesifikasi Flir 420 secara detail dapat dilihat pada lampiran.

C. Thermal Measurement dan Datalogger DAQ Pro 5300

DAQ Pro 5300 ini digunakan untuk menyimpan data temperatur dengan menggunakan sensor Temperatur PT100 RTD 2 *channel* yang akan dipasang pada permukaan *winding* dan permukaan *heatsink*. Selain itu DAQ Pro juga dapat digunakan untuk menyimpan data tekanan statis dan stagnasi menggunakan sensor *Pressure transducer* dan *Pitot tube*. Tekanan statis dan stagnasi ini diukur untuk mengetahui kecepatan aliran fluida.



Gambar 3. 14 : DAQ Pro 5300 dan Thermocouple

D. Dimmer AC 220V dan *External Fan*

Dimmer AC 220V digunakan untuk mengontrol kecepatan eksternal fan yang digunakan. Informasi *power* yang digunakan menyesuaikan dengan kebutuhan energi pada kipas.

E. 1 Set GESITS dengan *Axial* BLDC Motor

Unit GESITS digunakan untuk mensupport *Axial* BLDC Motor agar dapat beroperasi sesuai dengan variabel bebas yang direncanakan.

F. Picoscope

Picoscope digunakan untuk mengukur arus listrik pada input baterai sehingga akan diperoleh energi input.

G. Voltmeter

Voltmeter digunakan untuk mengukur tegangan input baterai sehingga dapat diperoleh energi input. Voltmeter menggunakan Kyoritsu KEW 1021R sesuai pada gambar berikut :



Gambar 3. 15 : Digital Multimeter

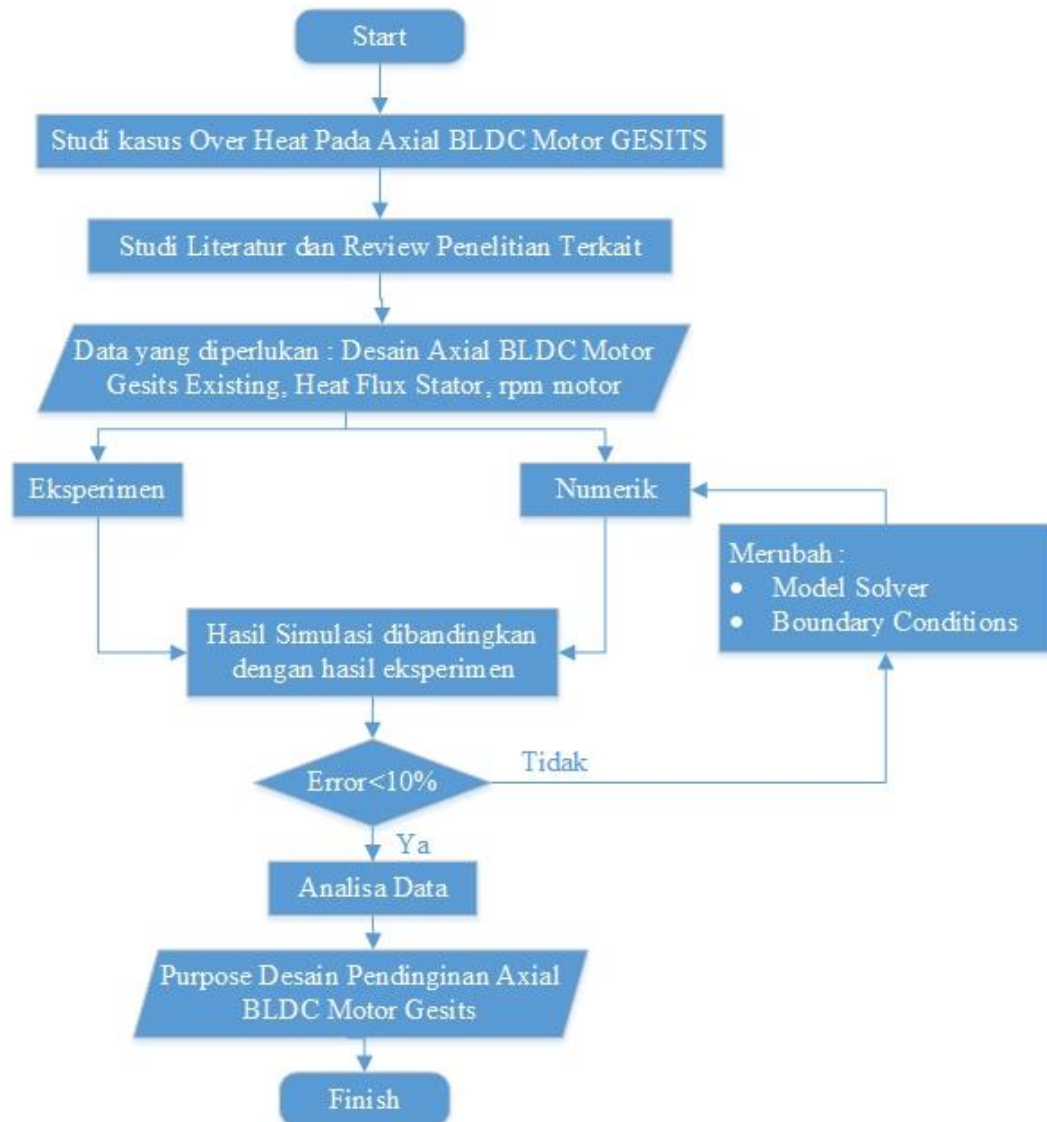
3.2.3. Prosedur Pengambilan Data Eksperimen

Berikut prosedur pengambilan data eksperimen ini :

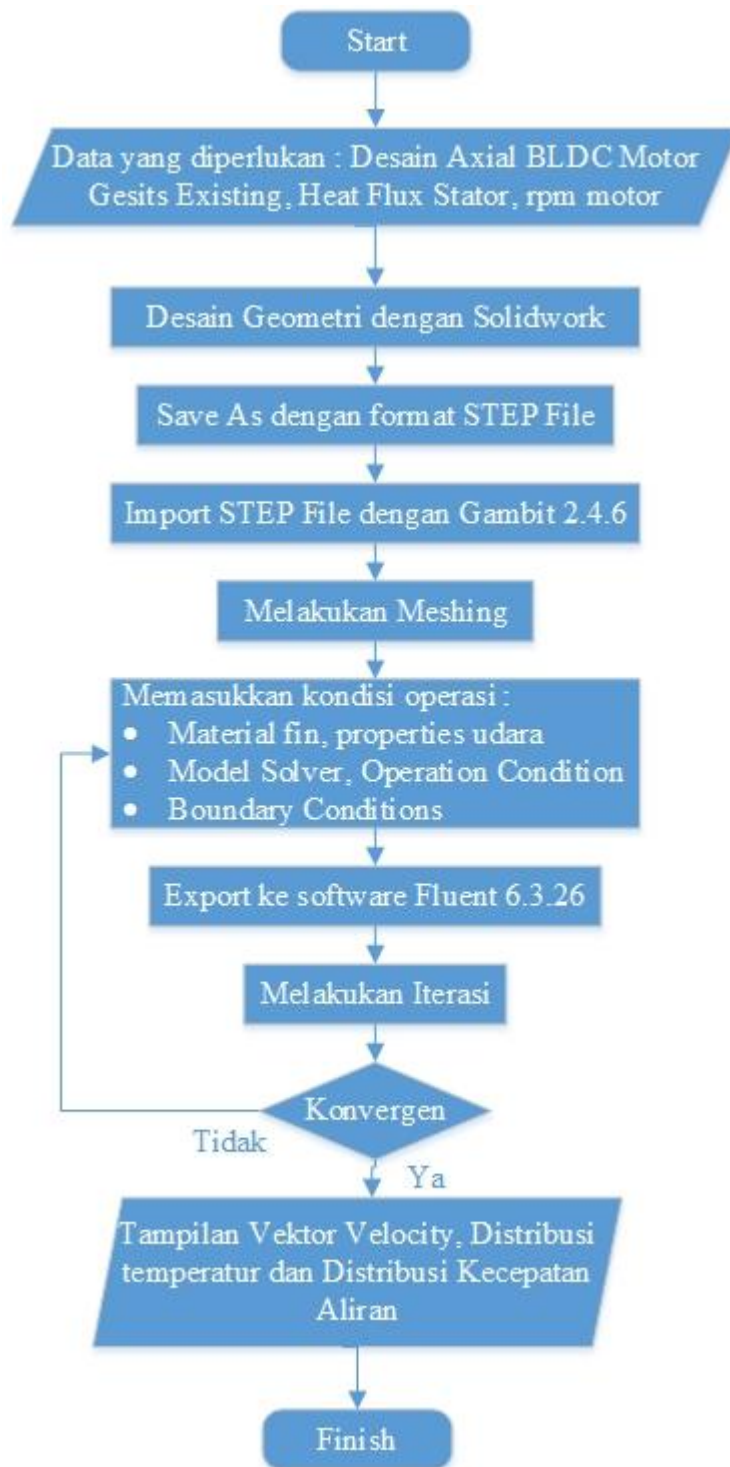
1. Men-*setting* seluruh komponen pendukung sesuai dengan gambar pada instalasi penelitian.
2. Melakukan uji coba pengukuran pada setiap alat ukur untuk memastikan seluruh alat ukur bekerja dengan baik.
3. Melakukan kalibrasi alat.
4. Memastikan kapasitas baterai GESITS pada level 80% atau di atasnya agar dapat digunakan untuk keseluruhan pengujian.
5. Menyalakan *Chassis Dynamometer* dan *eksternal fan* dengan kecepatan fluida sesuai dengan kecepatan pada variabel bebas yaitu 1000 rpm.
6. Menyalakan GESITS dan menambah kecepatan motor listrik hingga pada dynamometer tertera 1000 rpm. mempertahankan posisi *throttle* tersebut selama 15 menit. Mengaktifkan seluruh pengukuran sesuai dengan variabel terikat yang diperlukan (*datalogger* dan pengukuran *manual*).
7. Mencatat hasil pengukuran dan menyimpan data pada datalogger.
8. Memotret *Axial* BLDC Motor dari berbagai sudut pandang dengan menggunakan *Infrared Camera*.
9. Mengulang prosedur tersebut dengan variasi putaran *Axial* BLDC Motor 1500, 2000, 2500 dan 3000 rpm.



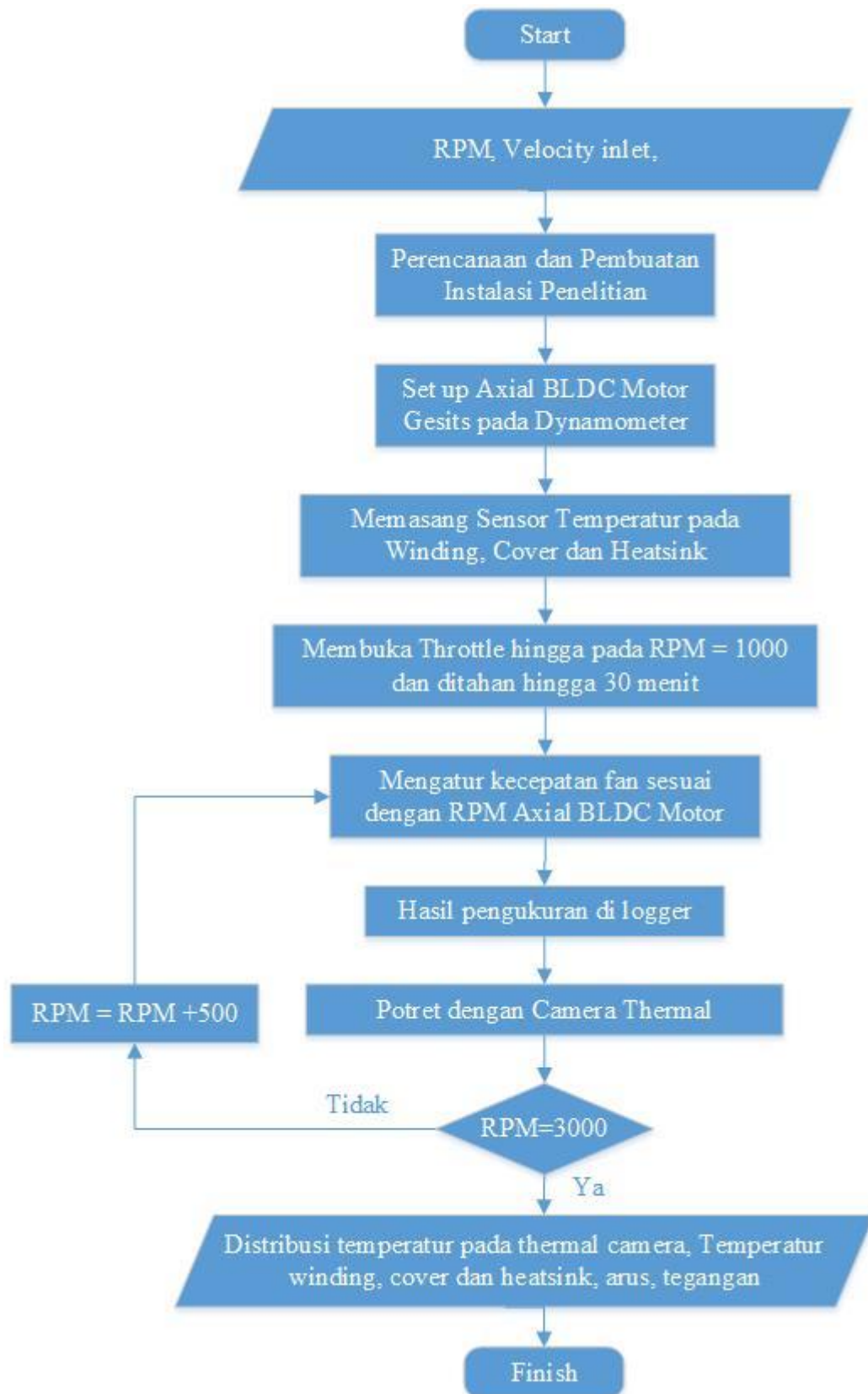
3.3 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 16 : Flowchart Penelitian



Gambar 3.17 : Flow Chart Metode Numerik



Gambar 3.18 : Flowchart Metode Eksperimen



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa dan pembahasan data dari hasil eksperimen dan numerik. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik sedangkan data kualitatif merupakan hasil dari visualisasi aliran dan distribusi temperatur. Data-data eksperimen diperoleh dari hasil pengukuran temperatur pada *Winding*, *Core* dan *Cover Casing* serta pengukuran arus pada *phase Axial BLDC Motor*. Data-data yang telah didapatkan kemudian diolah dengan proses perhitungan dan dituangkan ke dalam grafik hubungan temperatur dengan putaran *Axial BLDC Motor*. *Thermal Camera* digunakan untuk memperoleh distribusi temperatur *Axial BLDC Motor* secara visual sehingga dapat dibandingkan dengan hasil numerik.

Kemudian data dari hasil eksperimen dibandingkan dengan data yang diperoleh dari numerik dengan bantuan *software fluent*. Data hasil numerik ini berupa hasil perhitungan dan bentuk visual seperti distribusi temperatur, dan distribusi kecepatan. Hasil numerik dapat dikatakan valid apabila error yang terjadi tidak melebihi 10%. Metode simulasi yang sudah tervalidasi digunakan untuk mengevaluasi desain pendinginan *Axial BLDC Motor* ini.

Parameter-parameter yang diperlukan untuk simulasi ini adalah sebagai berikut :

Hambatan <i>Internal Axial BLDC Motor</i>	: 0.036 Ω
Jumlah Fasa Motor	: 3 Fasa
<i>Volume Core</i>	: 0.000442549 m ³
<i>Volume Winding</i>	: 0.000516855 m ³

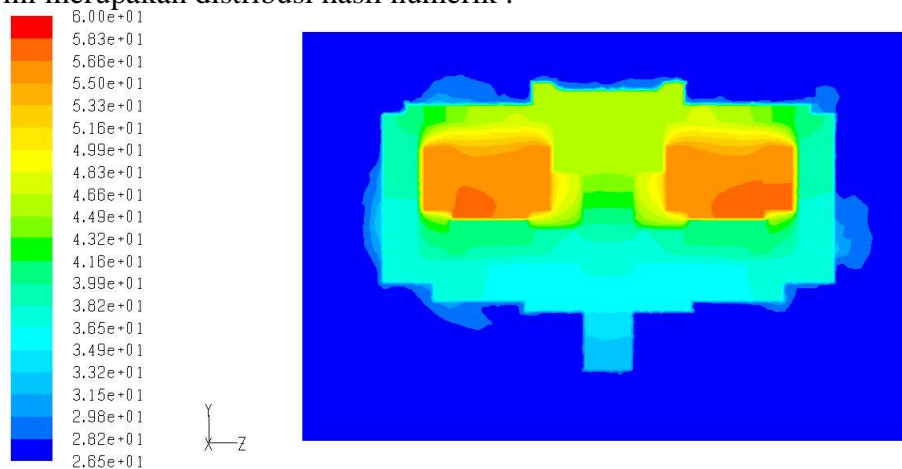


Tabel 4. 1 : Heat Generation pada Axial BLDC Motor yang Digunakan

Putaran (RPM)	Current Phase (A)	Coreloss (Watt)	Winding Loss (Watt)	Heat Generation	
				Pada Core (W/m3)	Pada Winding (W/m3)
1000	32.89	40	116.82923	90385.47144	226038.6894
1500	33.92	60	124.26117	135578.2072	240417.8565
2000	36.37	105	142.85991	237261.8625	276402.2892
2500	37.53	150	152.1181	338945.5179	294314.8411
3000	37.59	210	152.60487	474523.7251	295256.648

4.1 Distribusi Temperatur Axial BLDC Motor

Berikut ini merupakan distribusi hasil numerik :



Gambar 4. 1 : Distribusi Temperatur Surface X=0 pada Putaran 1500 rpm

Gambar 4.1 merupakan distribusi temperatur surface X=0 pada putaran 1500 rpm yang diperoleh dari hasil simulasi numerik. Distribusi temperatur yang terjadi tidak dapat merata ke seluruh permukaan *heatsink*. Hal ini disebabkan oleh posisi *heat generation* (*winding* dan *core*) tidak simetri dengan posisi *heatsink*. Posisi terdekat dengan sumber panas adalah pada *cover casing* (berhimpit dengan *core*). Hal ini menyebabkan daerah ini memiliki temperatur yang terbesar dibandingkan dengan permukaan *heatsink* lainnya.

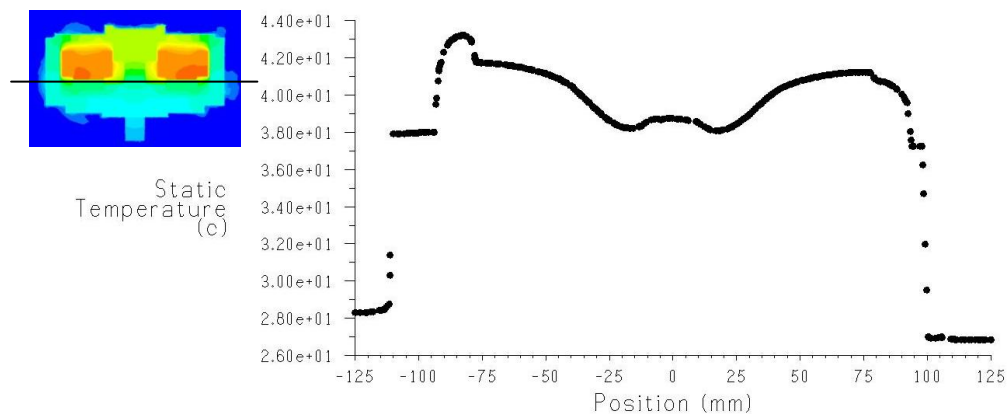
Perpindahan panas juga terjadi secara konveksi dengan udara yang terjebak di dalam motor. Udara di dalam motor tidak tersirkulasi sehingga perpindahan panas yang terjadi tidak optimal dimana sebagian besar perpindahan



panas yang terjadi ke arah *cover casing*. Temperatur tertinggi terjadi pada posisi winding bagian pojok terdekat dengan magnet. Peneliti menyarankan untuk meletakkan sensor temperatur di sekitar titik ini agar *winding* dapat diproteksi dari *over heat*. Selain itu, temperatur magnet juga perlu diperhatikan dalam mendesain pendinginan pada *Axial BLDC Motor*.

Kondisi aktual *bearing* pada poros motor juga akan menghasilkan panas. *Heat generation* akibat gesekan pada *bearing* diabaikan, sehingga secara aktual distribusi temperatur disekitar *bearing* tidak merata. Sedangkan pada hasil simulasi tersebut distribusi yang terjadi tersebar secara merata.

Distribusi temperatur yang sesuai pada gambar 4.1 dapat dikuantitatifkan menjadi grafik sebagai berikut :



Gambar 4.2 : Distribusi Temperatur pada $Y=0$, $Z=0$ saat Putaran 1500 rpm

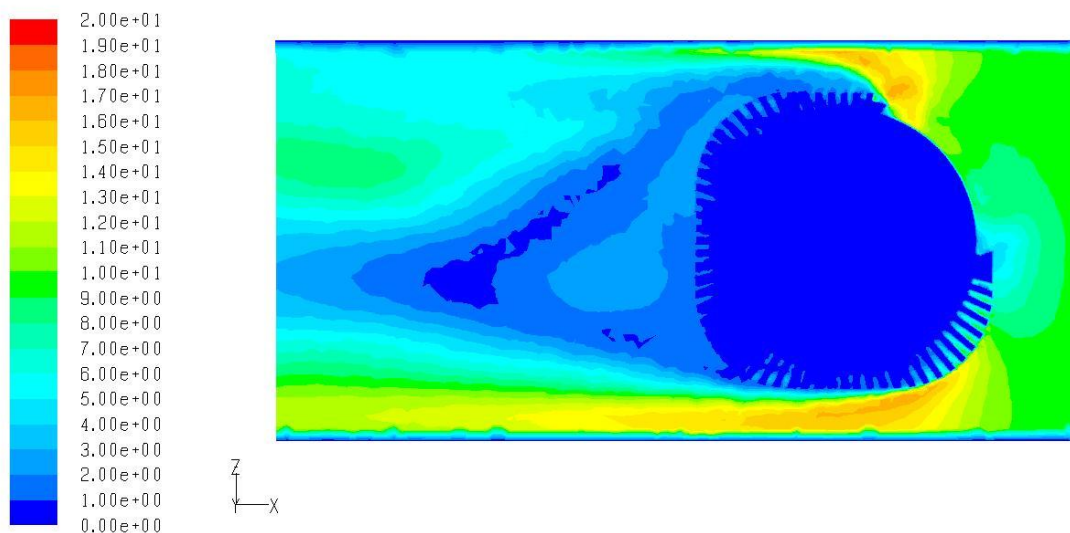
Gambar 4.2 merupakan grafik temperatur yang diperoleh dari hasil *plot XY CFD* pada $Y=0$, $Z=0$ saat putaran motor 1500 rpm. Posisinya terletak pada titik pusat rotor, sehingga terdapat temperatur magnet dan poros rotor. Secara umum distribusi temperatur yang terjadi tidak simetri karena pada $X = 125$ merupakan *inlet velocity* sehingga daerah disekitarnya mengalami pendinginan yang lebih baik dibandingkan pada posisi arah sebaliknya. Distribusi temperatur pada $-80 < x < 50$ dan $50 < x < 75$ merupakan posisi magnet. Distribusi yang terjadi berbentuk *parabolic* dikarenakan daerah ini merupakan daerah terdekat dengan sumber panas. Antara magnet dan *core* terdapat *gap* 2 mm, jarak ini cukup dekat sehingga dapat mempengaruhi distribusi temperatur pada magnet.



Sedangkan pada posisi $-80 < X < -70$ merupakan posisi magnet yang dekat dengan *winding* dan *core* sehingga temperatur yang terjadi paling panas diantara yang lain.

Distribusi temperatur pada $-25 < x < 25$ merupakan posisi poros rotor. Temperatur yang terjadi lebih rendah dibandingkan dengan magnet karena daerah ini memiliki *gap* yang lebih jauh dengan sumber panas. Distribusi temperatur pada $-125 < X < 100$ dan $100 < X < 125$ merupakan perpindahan panas yang terjadi secara konveksi dengan udara luar. Daerah ini mengalami penurunan temperatur yang sangat drastis.

Selain posisi benda terhadap sumber panas, distribusi temperatur juga dipengaruhi oleh kontur kecepatan fluida yang terjadi. Distribusi kecepatan yang terjadi sangat dipengaruhi oleh *geometry* dari suatu benda. Dalam hal ini, arah fin juga dapat mempengaruhi distribusi kecepatan yang terjadi. Berikut ini merupakan distribusi kecepatan hasil simulasi numerik :



Gambar 4. 3 : Distribusi Kecepatan Aliran pada Putaran 1500 rpm dengan Inlet Velocity 9.17 m/s

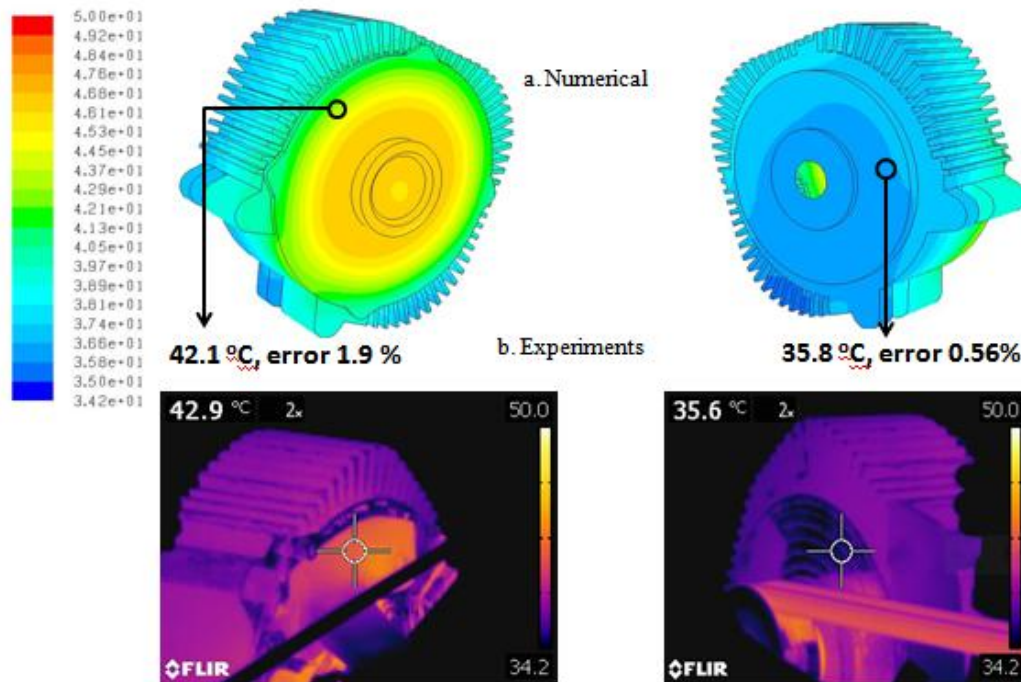
Gambar 4.3 menunjukkan distribusi kecepatan yang terjadi pada *Axial* BLDC Motor saat *inlet velocity* 9.17 m/s dengan putaran motor 1500 rpm. Terlihat distribusinya tidak merata. Kecepatan fluida yang paling kecil terjadi pada rongga *heatsink*, artinya *heatsink* tidak akan mampu mentransfer panas



secara optimal. Konsep dasar perpindahan panas dengan fin adalah memperbesar luas penampang kontak dengan udara lingkungan. Melihat hasil tersebut maka daerah fin yang memiliki distribusi kecepatan terkecil tersebut akan berkerja tidak optimal. Menurut saran penulis sebaiknya arah fin yang digunakan sejajar dengan arah aliran sehingga permukaan yang dilalui aliran fluida dapat semakin besar. Atau apabila desain tersebut sulit untuk difabrikasi, sebaiknya diberi *External Fan* yang arahnya sesuai dengan arah fin tersebut. Daerah yang perlu ditambahkan dengan fin yaitu pada *cover heatsink*.

4.2 Validasi secara Kualitatif

Metode eksperimen menggunakan variabel bebas putaran Axial BLDC Motor dengan variasi 1000, 1500, 2000, 2500 dan 3000 rpm. Pada kondisi aktual kecepatan putaran motor juga akan mempengaruhi kecepatan aliran udara. Karena *fan* yang digunakan tidak dapat dikontrol kecepatannya, maka kecepatan aliran udara didekati konstan. Kompensasi pendekatan ini yaitu dengan menggunakan *boundary condition inlet velocity* yang konstan juga, sehingga simulasi dan eksperimen memiliki kondisi yang sama. Kecepatan aliran udara diperoleh melalui pengukuran dengan *pitot tube* dan manometer digital sehingga diperoleh delta tekanan statis dan stagnasi sebesar 0.05 Kpa. Nilai ini digunakan untuk menghitung kecepatan aliran melalui hukum *Bernoulli*, sehingga diperoleh kecepatan aliran 9.17 m/s. Berikut ini merupakan hasil simulasi dan eksperimen yang diperoleh dalam tesis ini :



Gambar 4.4 : Distribusi Temperatur dengan Putaran 1500 rpm Hasil Numerik dan Eksperimen

Gambar 4.4 merupakan komparasi distribusi temperatur dengan putaran 1500 rpm dari hasil simulasi numerik dan eksperimen. Secara umum distribusi temperaturnya memiliki kesamaan. Titik pengukuran pada potret *thermal camera* menunjukkan temperatur 42.9 °C. Pada posisi ini diperoleh hasil simulasi dengan temperatur 42.1 °C. Pada titik ini memiliki *error* sebesar 1.9 %. Sedangkan pada posisi sebaliknya (dekat dengan poros motor) hasil eksperimen menunjukkan temperatur 35.6 °C dan hasil simulasi sebesar 35.8°C sehingga pada titik ini memiliki *error* 0.56 %. Berdasarkan distribusi temperatur dan data pada kedua titik tersebut maka dapat disimpulkan hasil simulasi ini valid dengan hasil eksperimen baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Selanjutnya metode numerik ini dapat digunakan untuk mengevaluasi desain pendinginan pada *Axial BLDC Motor* ini.

Hasil eksperimen menunjukkan *belt* pada motor ini juga sebagai *heat generation*. Hal ini disebabkan adanya gesekan dengan *pulley*. Sehingga secara aktual kondisi ini akan mempengaruhi distribusi temperatur di sekitar poros

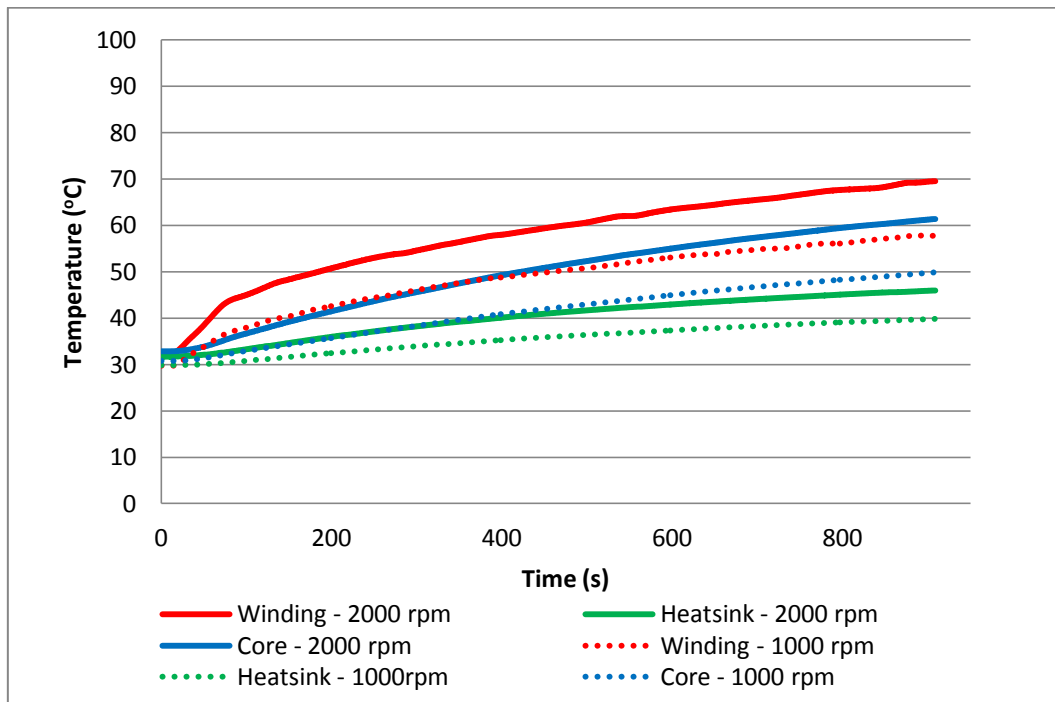


motor. Apabila diamati secara detail, distribusi temperatur hasil simulasi berbeda dengan hasil eksperimen. Kondisi ini diabaikan pada simulasi ini.

Temperatur terpanas terjadi pada *cover heatsink* hal ini sesuai dengan hipotesis dan hasil eksperimen bahwa *cover heatsink* memiliki temperatur paling panas diantara *heatsink* yang lain. Sehingga perpindahan panas pada *cover* perlu diperhatikan lebih lanjut, apakah pendinginan yang terjadi sesuai kebutuhan atau tidak. *Cover casing* ini merupakan daerah yang paling mempengaruhi Efektifitas *fin Axial BLDC Motor*. Sehingga daerah ini perlu didesain secara khusus untuk mengoptimalkan pendinginan motor ini. Apabila pendinginan motor sudah tercapai namun temperatur pada permukaan *cover heatsink* ini masih terlalu panas untuk disentuh pengendara, cukup perlu diberi pelindung agar tidak bisa disentuh pengendara. Namun apabila pendinginan belum mencukupi, maka *cover casing* dapat diberi *fin* tambahan ataupun kipas eksternal.

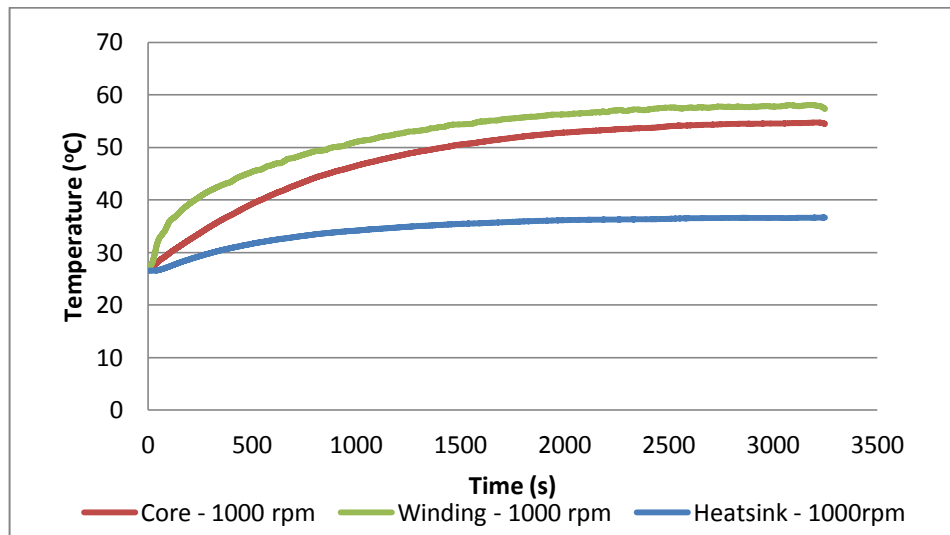
4.3 Validasi secara Kuantitatif

Posisi sensor *thermistor* terletak pada 3 titik. Posisi peletakkan secara visual dapat dilihat pada gambar 3.11. Sensor pertama diletakkan pada dinding *core* dengan koordinat $x = 0$ mm, $y = 8.41$ mm, $z = 76$ mm. Sensor kedua diletakkan pada dinding *winding* dengan koordinat $x = 0$ mm, $y = 28.15$ mm, $z = 90$ mm. Sensor ketiga diletakkan pada dinding *cover casing* dengan koordinat $x = 0$ mm, $y = 56.15$ mm, $z = 90$ mm. Titik sumbu terletak pada *center volume* rotor. Berikut ini merupakan grafik hasil eksperimen :



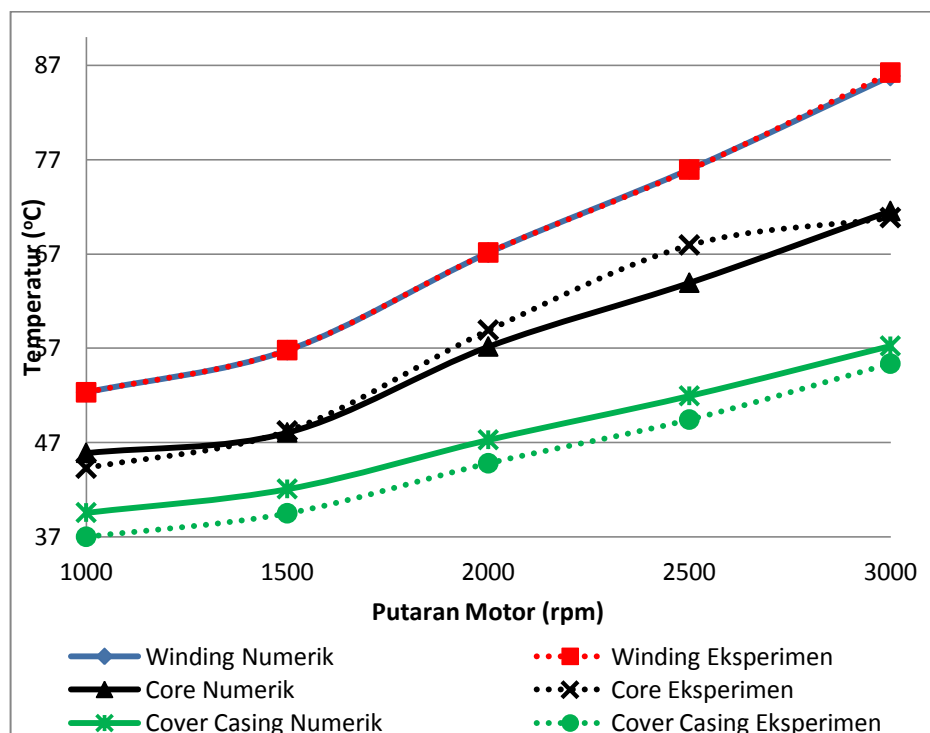
Gambar 4.5 : Data Temperatur BLDC Motor Hasil Eksperimen

Gambar 4.5 merupakan data temperatur BLDC Motor hasil eksperimen di 3 titik pengukuran dengan putaran motor 1000 rpm dan 2000 rpm. Berdasarkan *trend* grafik tersebut maka dapat diketahui bahwa temperatur terbesar pada *Winding* dan terendah pada *cover heatsink*. Semakin besar putaran *Axial BLDC Motor* maka semakin besar temperaturnya. Secara fisik kondisi ini terjadi secara aktual, dimana semakin besar putaran motor maka diperlukan arus listrik yang besar pula. Semakin besar arus listrik yang mengalir pada kumparan motor maka *losses* akibat *resistance* akan semakin besar. *Trend* diawal terlihat memiliki *slope* yang lebih curam dibandingkan dengan yang lain. Kondisi ini terjadi saat *starting* motor. Pada saat motor mulai berputar, arus yang ditarik cukup besar (secara detail dapat dilihat pada lampiran) sehingga *losses* juga akan semakin besar. *Trend* line yang terbentuk masih terus naik sehingga perlu dilakukan pengujian tambahan. Secara teori temperatur yang terjadi akan *steady* di titik tertentu. Sehingga dilakukan pengujian eksperimen dengan memperlama proses pengambilan data. Data tersebut sesuai dengan gambar berikut :



Gambar 4. 6 : Data Temperatur Hasil Eksperimen dengan Lama Pengukuran Diperpanjang

Grafik pada gambar 4.6 merupakan data hasil eksperimen dengan lama pengambilan data 3000 detik. Pada detik ke 1500 temperatur heatsink mulai stabil sedangkan temperatur winding dan core masih naik dengan perubahan yang kecil. Terjadinya kurva temperatur yang steady menandakan pendinginan Axial BLDC Motor cukup pada kondisi operasi tersebut.



Gambar 4.7 : Perbandingan Data Hasil Numerik dan Eksperimen



Gambar 4.6 merupakan perbandingan data hasil eksperimen dan numerik di 3 titik pengukuran. *Trend* pada *Winding* seakan-akan berimpit, hal ini menunjukkan bahwa *heat generation* yang diperoleh dari hasil perhitungan hampir sesuai dengan kondisi aktual. *Error* terbesar pada titik *Winding* yaitu sebesar 0.4% hal ini dikarenakan hasil perhitungan *heat generation* benar dengan data hasil pengukuran arus yang tepat. Pengukuran arus menggunakan instrumentasi yang sangat teliti dan dapat *me-logger* data dengan baik, sehingga kesalahan pengukuran dapat dihindari.

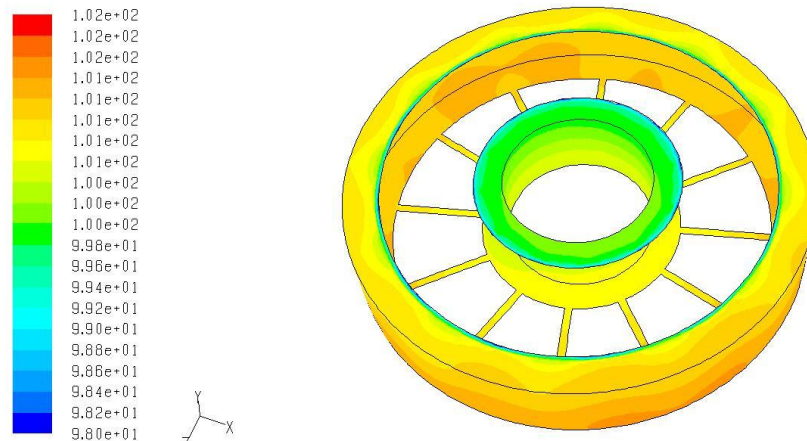
Trend grafik temperatur pada *core* cenderung tidak stabil. Hal ini dapat disebabkan oleh pemakaian data *heat loss* akibat *core* tidak sesuai dengan *Axial BLDC Motor* yang digunakan. *Heat loss* akibat *core* peneliti dapatkan dari referensi gambar 2.6 sehingga sangat memungkinkan tidak sesuai dengan kondisi benda uji. Namun *error* terbesar yang terjadi masih dapat diterima yaitu sebesar 5.89 %. Sehingga hasil ini masih dapat diterima dan tidak terlalu signifikan mempengaruhi distribusi temperatur yang lain. Efeknya dapat dilihat pada *trend* grafik temperatur *cover casing*. *Trend* hasil simulasi dan eksperimen memiliki *error* terbesar 6.94 %. Berdasarkan grafik tersebut maka dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi sesuai dengan hasil eksperimen dengan toleransi *error* maksimal 6.94%.

1.4 Uji Pendinginan *Axial BLDC Gesits*

Metode simulasi yang digunakan sudah tervalidasi dengan data eksperimen dengan *error* maksimal sebesar 6.93%, sehingga metode simulasi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi pendinginan pada *Axial BLDC Motor Gesits*. Pengujian pendinginan *Axial BLDC Motor Gesits* dilakukan pada kecepatan *Gesits* maksimal sesuai spesifikasi. Kecepatan maksimal yang diharapkan adalah mencapai 100 km/jam atau senilai 27.78 m/s. Kecepatan aliran ini digunakan sebagai *boundary condition inlet velocity*. Nilai *heat generation* diperoleh melalui hasil perhitungan dari data eksperimen. Data Eksperimen yang diperlukan pada kondisi ini adalah arus *phase* motor. Sehingga eksperimen juga dilakukan pada kecepatan ini untuk mendapatkan data arus *phase* motor yang dibutuhkan. Eksperimen yang dilakukan memperoleh data arus sebesar 62.52 A. Sehingga

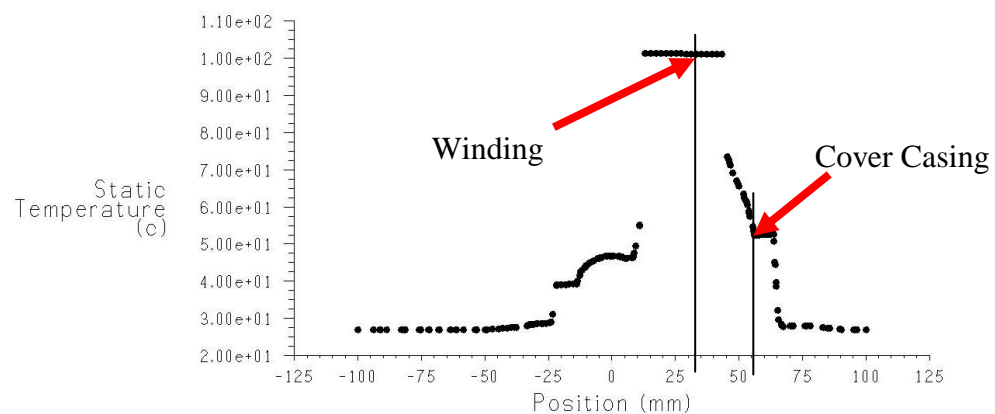


sesuai perhitungan diperoleh *heat generation* pada *winding* sebesar 816.757,201 Watt/m³ dan *heat generation core* sebesar 474.523,73 Watt/m³. Berdasarkan parameter tersebut dapat diperoleh hasil simulasi sebagai berikut :



Gambar 4.8 : Distribusi Temperatur pada Winding saat Kecepatan 100 km/jam

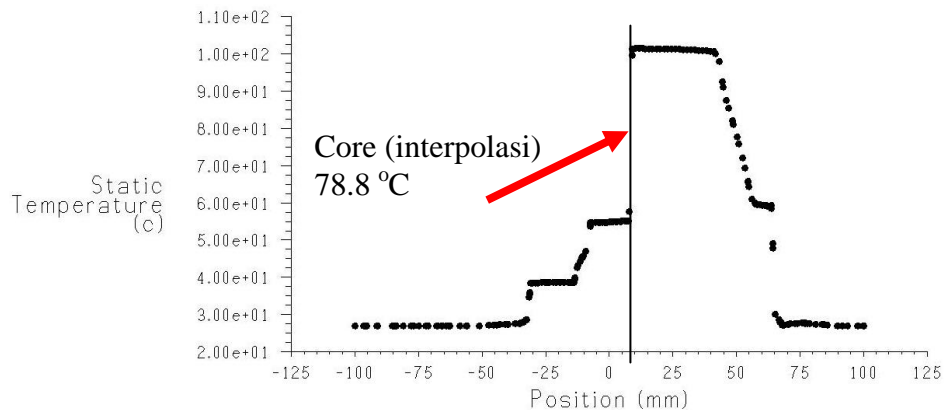
Gambar 4.7 merupakan distribusi temperatur pada *Winding* saat kecepatan 100 km/jam. Distribusi temperatur yang terjadi pada *winding* cenderung lebih merata. Estimasi temperatur terbesar adalah 101.98 °C. Distribusi temperatur ini dapat digunakan sebagai penentu apakah pendinginan pada *Axial BLDC Motor* ini cukup. Parameter pendinginan dikatakan sesuai kebutuhan sebenarnya terletak pada temperatur pada *winding*. Apabila temperatur pada *winding* masih pada daerah kerja kawat email yang digunakan maka pendinginan yang terjadi masih mencukupi. Pendinginan dikatakan cukup apabila temperatur *winding* tidak melebihi (125 – 155 °C). Apabila ditinjau dari hasil ini maka pendinginan *Axial BLDC* ini masih cukup. Secara kuantitatif dapat dilihat pada grafik berikut :



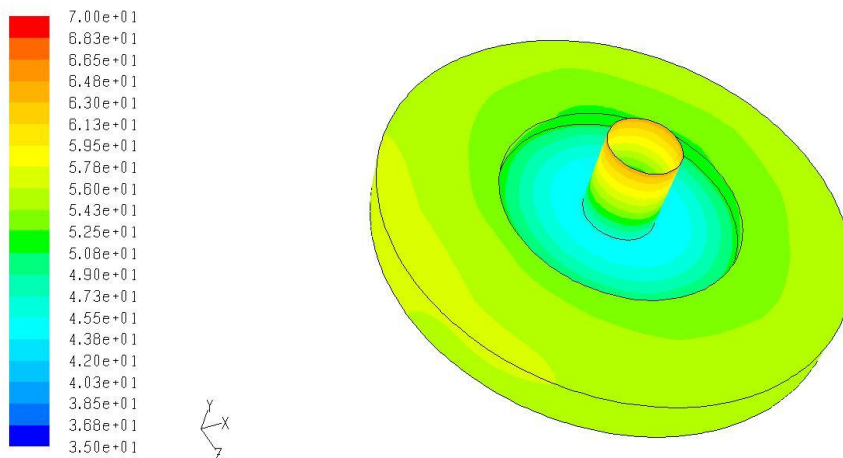
Gambar 4.9 : Distribusi Temperatur pada X=0, Z=90 saat Putaran 5000 rpm



Berikut merupakan grafik distribusi temperatur yang melalui posisi sensor pada Core. Distribusi ini merupakan hasil simulasi temperatur pada core.

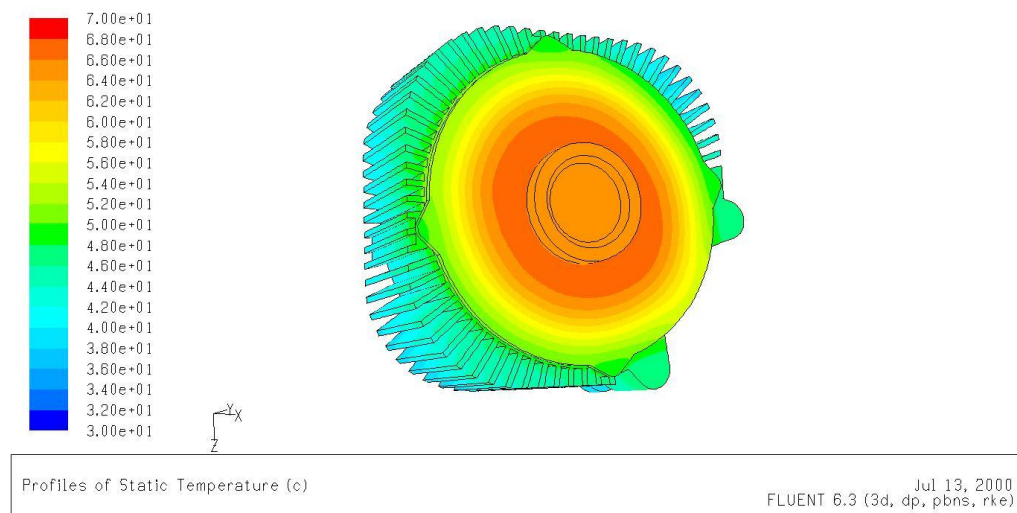


Gambar 4. 10 : Distribusi Temperatur pada X=0, Z=76 saat Putaran 5000rpm



Gambar 4.11 : Distribusi Temperatur pada Rotor saat Kecepatan 100 km/jam

Gambar 4.9 merupakan distribusi temperatur pada rotor sekaligus magnet saat putaran motor sebesar 5000 rpm. Temperatur pada magnet juga perlu dipertimbangkan dalam mendesain pendinginan *Axial BLDC Motor*. Magnet dengan temperatur tinggi dapat menyebabkan *power motor drop*, bahkan dapat meningkatkan *losses*. Temperatur kerja magnet *Neodinium* ini adalah sebesar 80 °C. Hasil simulasi menunjukkan temperatur maksimal pada magnet sebesar 57.8 °C sehingga desain pendinginan ini masih cukup.



Gambar 4.12 : Distribusi Temperatur pada Heatsink saat Kecepatan 100 km/jam

Gambar 4.12 merupakan distribusi temperatur pada rotor saat putaran motor 5000 rpm. Temperatur eksternal maksimal 68 °C. Temperatur ini masih cukup terlalu panas untuk disentuh oleh pengendara, sehingga saran peneliti diberikan isolator agar terlindung dari sentuhan pengendara. Untuk memperoleh pendinginan yang lebih merata pada daerah ini dapat ditambah dengan *pin fin*, sehingga efektifitas *pin fin* dapat bertambah baik.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen pada pendinginan *Axial BLDC Motor* Gesits dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Distribusi temperatur pada desain pendinginan *Axial BLDC Motor* Gesits saat ini ditinjau pada daerah cover casing (*heatsink*) dapat dilihat pada gambar 4.11, di daerah *winding* dapat dilihat pada gambar 4.7 dan di daerah magnet dapat dilihat pada gambar 4.10. Distribusi temperatur di bagian *cover casing* memiliki efektifitas yang rendah dan perlu diperhatikan desain pendinginan di daerah ini untuk lebih lanjut.
- 2) Hasil simulasi menggunakan CFD ini tervalidasi dengan hasil eksperimen baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Pengukuran temperatur pada kecepatan 1500 rpm menggunakan *thermal camera* menunjukkan temperatur 42.9 °C sedangkan hasil simulasi bertemperatur 42.1 °C. Pada titik ini memiliki *error* sebesar 1.9 %. Sedangkan pada posisi sebaliknya (dekat dengan poros motor) hasil eksperimen menunjukkan temperatur 35.6 °C sedangkan hasil simulasi sebesar 35.8°C sehingga pada titik ini memiliki *error* 0.56 %. *Error* hasil simulasi dan hasil pengukuran yang terlihat pada gambar 4.6 maksimal sebesar 6.93 % sehingga hasil simulasi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi pendinginan pada *Axial BLDC Motor* ini.
- 3) Temperatur *Winding* pada putaran motor 5000 rpm atau 100km/jam adalah sebesar 105 °C \pm 6.93% dengan temperatur magnet sebesar 57.8 °C \pm 6.93%.

Berdasarkan hasil tersebut maka pendinginan *Axial BLDC Motor* Gesits ini aman sesuai dengan spesifikasi.

5.2 Saran

Untuk memperbaiki desain *Axial BLDC Motor* ini peneliti memberikan saran dan rekomendasi sebagai berikut :



- 1) Sebaiknya perlu dilakukan pengujian secara numerik desain pendinginan Axial BLDC Motor dengan orientasi fin annular. Hipotesa penulis fin arah ini akan memiliki efektifitas yang lebih baik dibandingkan arah fin saat ini.
- 2) Distribusi temperatur pada *cover casing* terlihat tidak merata sehingga perlu ditambah dengan fin sehingga perpindahan panas bisa lebih efektif. Disarankan apabila menambah kipas eksternal, sebaiknya diletakkan di daerah ini.
- 3) Sensor temperatur sebaiknya ditambahkan pada motor ini di *Winding*.

5.3 Penelitian Selanjutnya

Untuk pengembangan Axial BLDC Motor GESITS perlu dilakukan penelitian lanjutan seperti berikut :

1. Analisa *Aerodynamic Body* dan *Guide Vane* pada GESITS untuk memperoleh *inlet velocity* yang terbaik agar sirkulasi udara pada motor dapat terjadi.
2. Pengujian Axial BLDC Motor dengan pembebanan menggunakan *Chassis Dynamometer*.
3. Uji performa Axial BLDC Motor untuk mengetahui *Peak Power* yang sesuai agar *Winding* dan Magnet tetap aman digunakan.
4. Modifikasi desain Axial BLDC Motor untuk memperoleh pendinginan yang optimal.
5. Pengaruh orientasi fin dan ketebalan fin terhadap pendinginan Axial BLDC Motor GESITS.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Almaghrabi, Mohammed. 2016. *Forced Convection Cooling of Electric Motors Using Enhanced Surfaces*. Florida : University of South Florida.
- [2] Vu, Duc Thuan. 2013. *New Cooling System Design of BLDC Motor for Electric Vehicle Using Computation Fluid Dynamics Modeling*. Journal of the KSTLE Vol. 29, No. 5, October 2013, pp. 318~323.
- [3] Chandrakant, Shinde Sandip, et al. 2013. *Numerical And Experimental Analysis Of Heat Transfer Through Various Types Of Fin Profiles By Forced Convection*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Vol. 2 Issue 7, July – 2013.
- [4] Fasil, Muhammed, et al. 2015. *Numerical and Experimental Investigation of Heat Flow in Permanent Magnet Brushless DC Hub Motor*. SAE International J. Alt. Power./ Volume 4, Issue 1 (May 2015).
- [5] Kuria, James dan Hwang, Pyung. 2011. *Optimizing Heat Sink Geometry for Electric Vehicle BLDC Motor Using CFD*. Kenya : Kenyatta University of Agriculture and Technology.
- [6] Montone, Dan. 2013. *Temperature Effects on Motor Performance*. USA : Pittman/Metek Precision Motion Control.
- [7] Cezario, Cassiano Antunes, et al. 2005. *Transient Thermal Analysis of an Induction Electric Motor*. 18th International Congress of Mechanical Engineering November 6-11, 2005, Ouro Preto, MG.
- [8] Incropera, Frank P. and David P. Dewitt, 2002. *Fundamental Heat and Mass Transfer sixth Edition*. College of Engineering.
- [9] Moran, M.J and Shapiro, H.N. 1996. *Fundamental of Engineering Thermodynamics Third Edition*. New York : John Willey and Sons inc.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Nganjuk, 08 Agustus 1990, merupakan anak terakhir dari 6 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Begadung 1 Nganjuk, SMPN 1 Kertosono dan SMAN 2 Nganjuk. Setelah lulus dari SMAN tahun 2009, Penulis mengikuti PMDK-Prestasi dan diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2009 dan terdaftar dengan NRP 2109100016. Di Jurusan Teknik Mesin ITS ini Penulis mengambil Bidang Studi Manufaktur.

Penulis mulai tertarik pada Sistem Kontrol dan masuk di Laboratorium Sistem dan Otomasi Industri pada semester 4. Penulis pernah mengikuti kegiatan World Solar Challenge 2013 di Darwin – Adelaide Australia. Penulis juga aktif mengikuti riset Mobil Listrik Nasional ITS sampai sekarang. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan mahasiswa seperti Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM), UKM Pramuka ITS, UKM Badminton ITS, dan Pemandu ITS. Penulis juga pernah menjadi grader mata kuliah Statika, dan Asisten Laboratorium di bidang Mekatronika.

Penulis melanjutkan program Magister Teknik di Jurusan Teknik Mesin ITS pada tahun 2015. Studi dilakukan selama 2 tahun dengan mengambil bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi. Penulis melakukan penelitian ini untuk membantu pengembangan Axial BLDC Motor di GESITS.

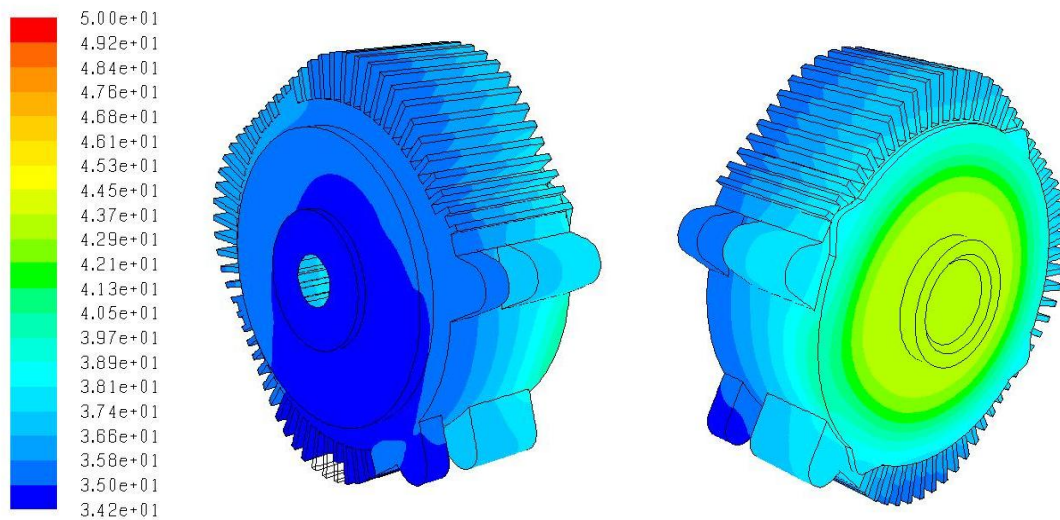
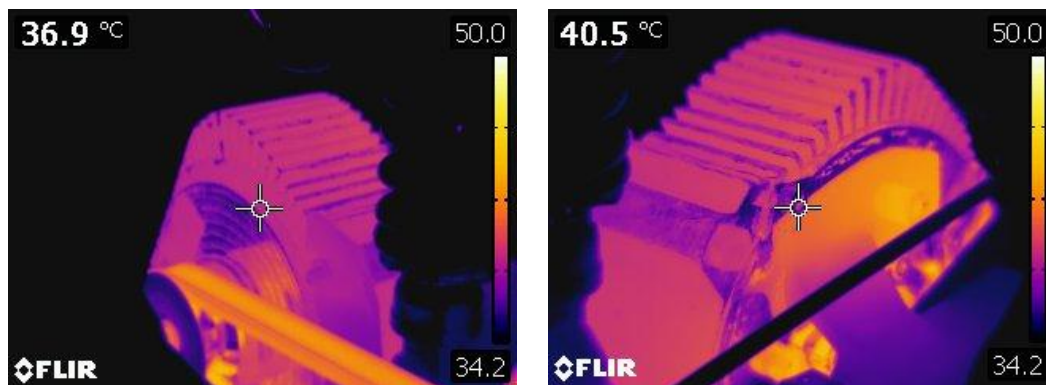


Halaman ini sengaja dikosongkan



Lampiran Hasil Foto Menggunakan Camera Flir

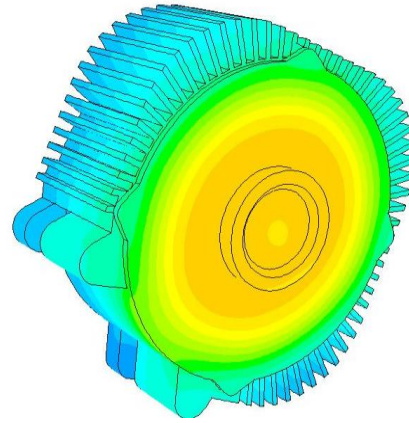
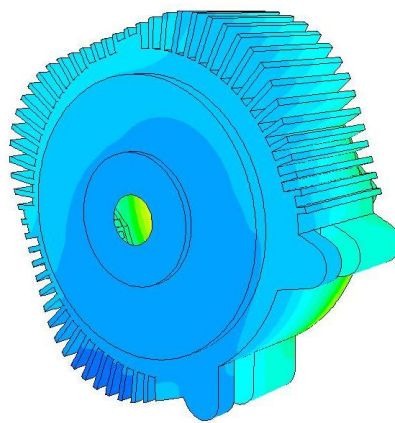
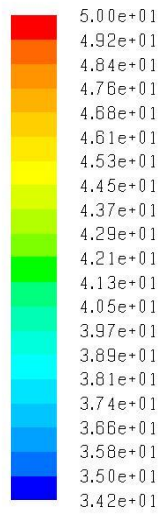
Perbandingan Distribusi Temperatur Hasil Eksperimen dan Numerik pada putaran 1000 rpm



Note : Temperatur hasil potret menggunakan thermal camera merupakan penunjukkan temperatur pada titik dimana titik tersebut tidak dapat dijaga tetap karena posisi memotret berubah.

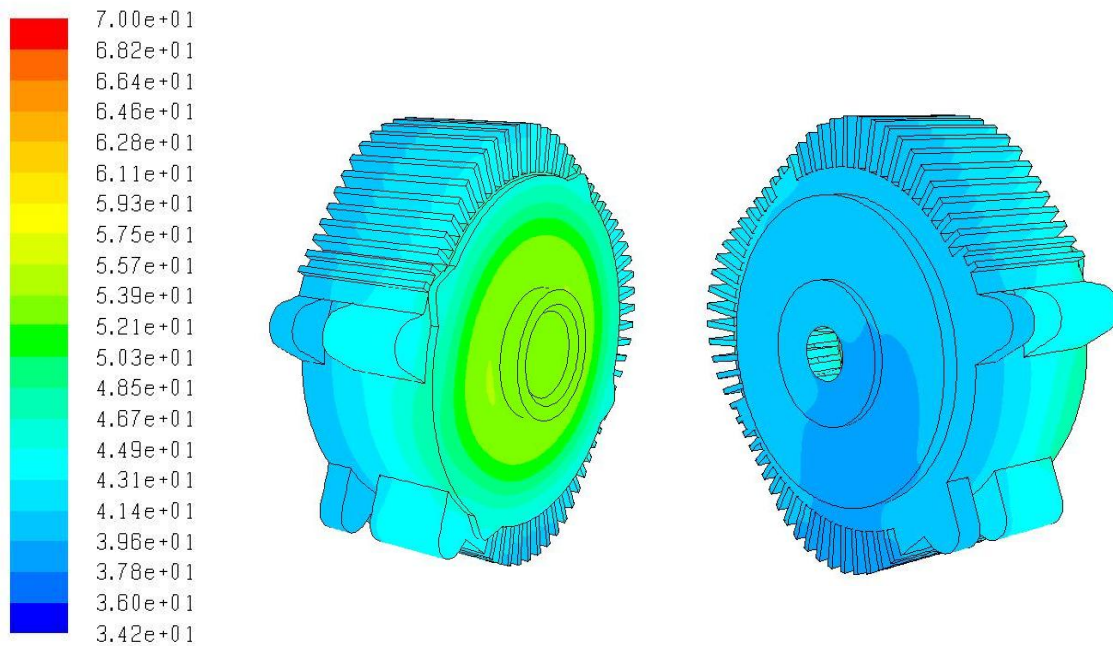
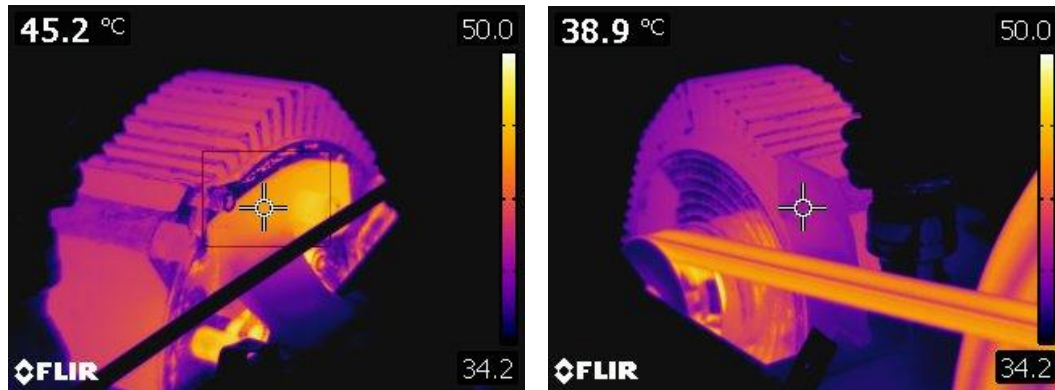


Perbandingan Distribusi Temperatur Hasil Eksperimen dan Numerik pada putaran 1500 rpm





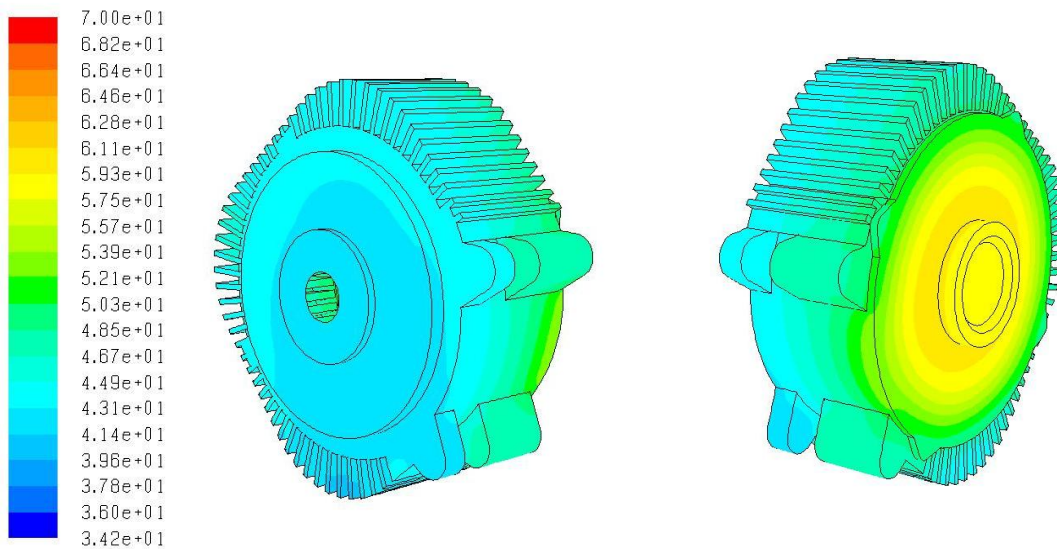
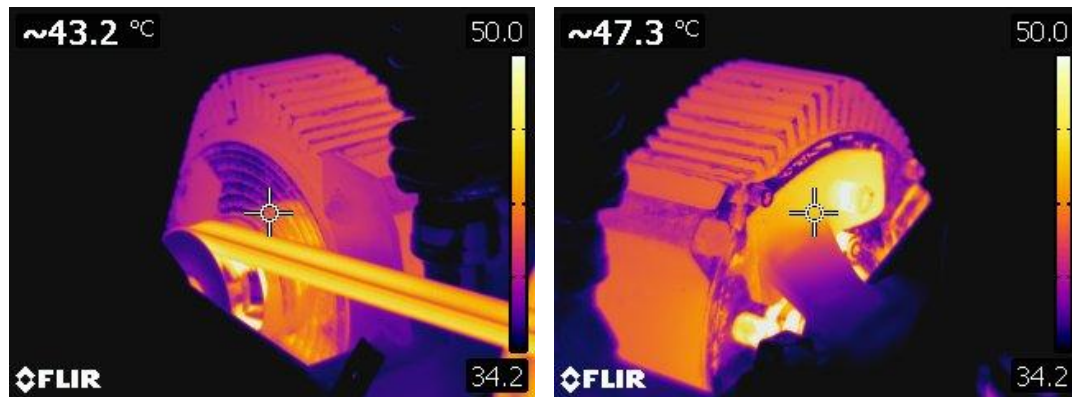
Perbandingan Distribusi Temperatur Hasil Eksperimen dan Numerik pada putaran 2000 rpm



Note : Range temperatur sengaja dibuat 34.2 – 70 °C agar distribusi temperatur di seluruh surface bisa terlihat.



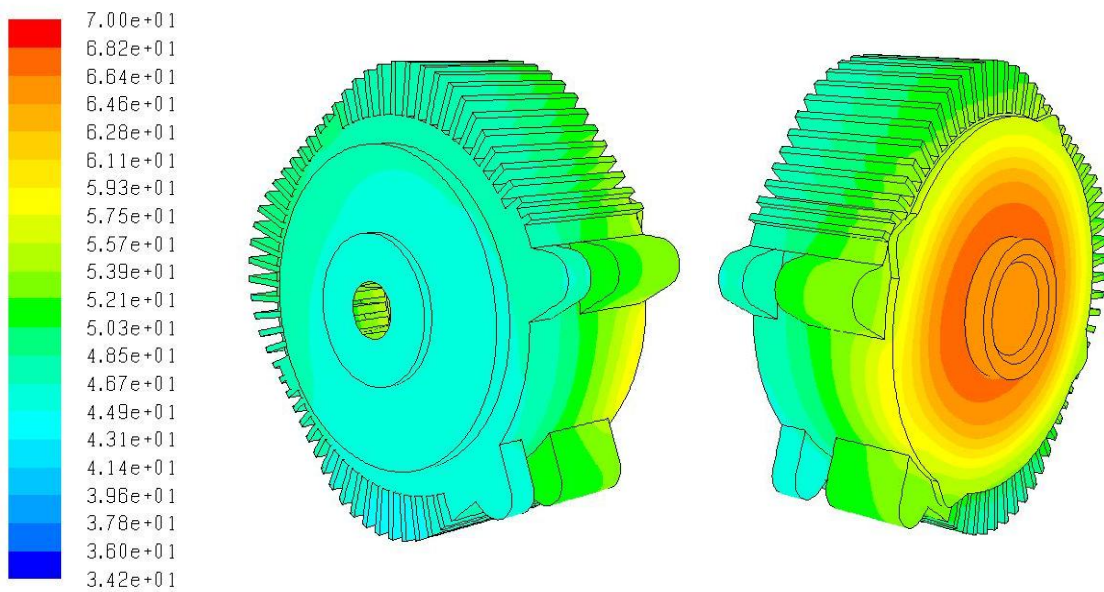
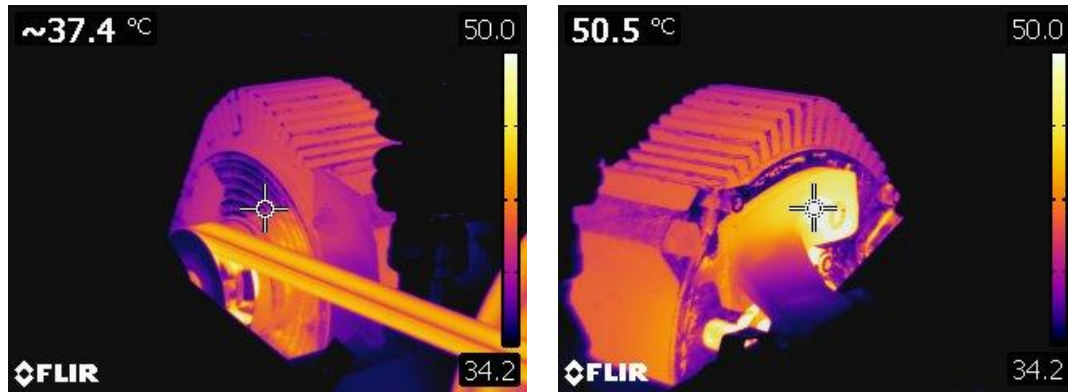
Perbandingan Distribusi Temperatur Hasil Eksperimen dan Numerik pada putaran 2500 rpm



Note : Range temperatur sengaja dibuat $34.2 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ agar distribusi temperatur di seluruh surface bisa terlihat.



Perbandingan Distribusi Temperatur Hasil Eksperimen dan Numerik pada putaran 3000 rpm

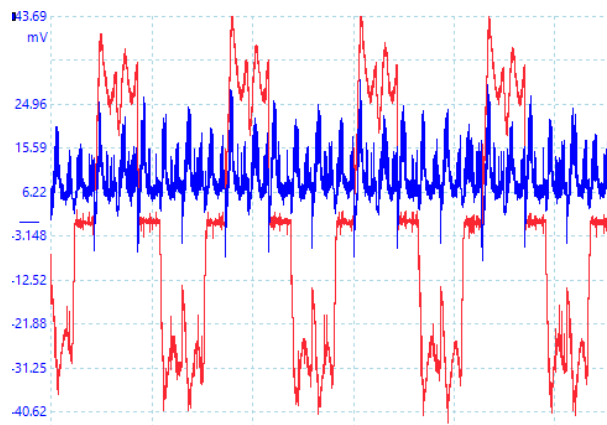


Note : Range temperatur sengaja dibuat 34.2 – 70 °C agar distribusi temperatur di seluruh surface bisa terlihat.

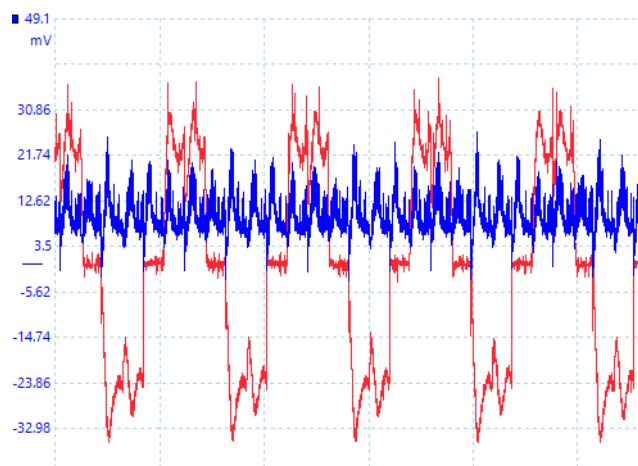


Lampiran Pico Scope

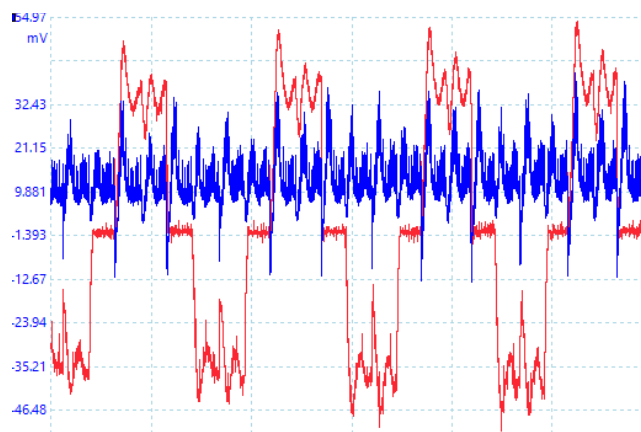
Pada putaran 1000 rpm



Pada putaran 1500 rpm

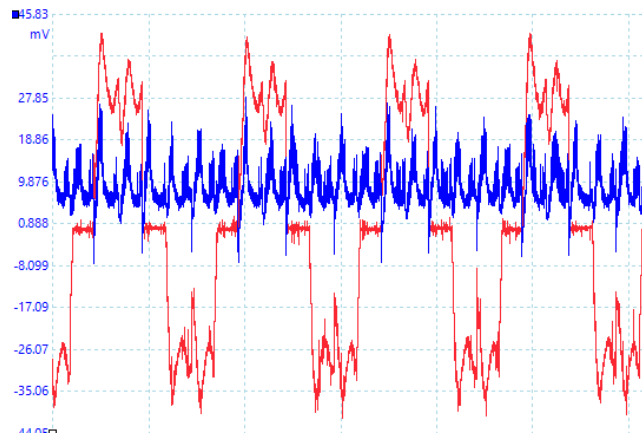


Pada putaran 2000 rpm

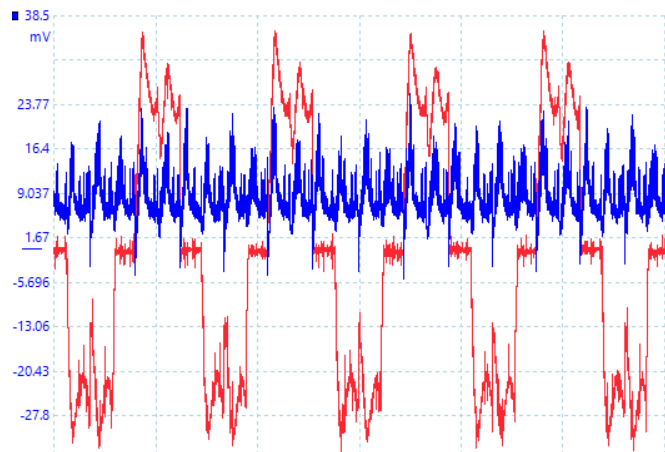




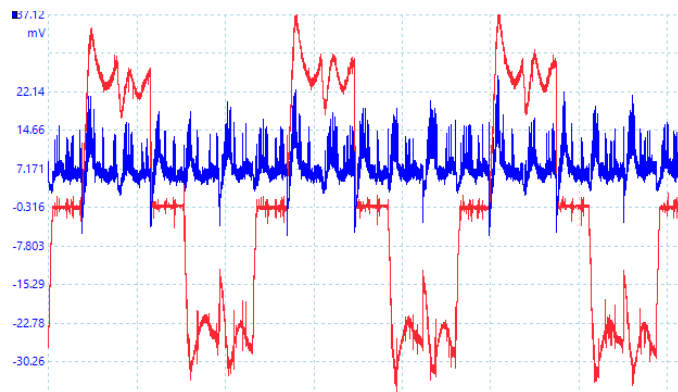
Pada putaran 2500 rpm



Pada putaran 3000 rpm

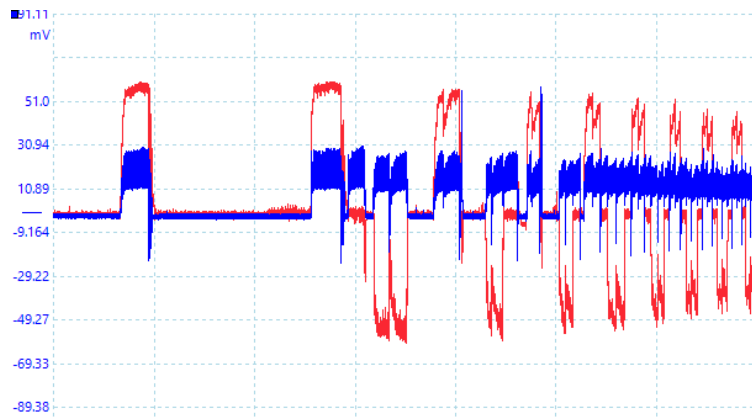


Pada putaran 5000 rpm





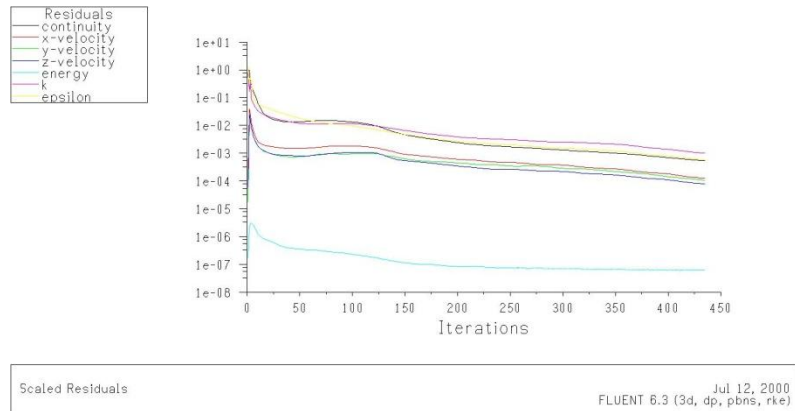
Current pada saat starting



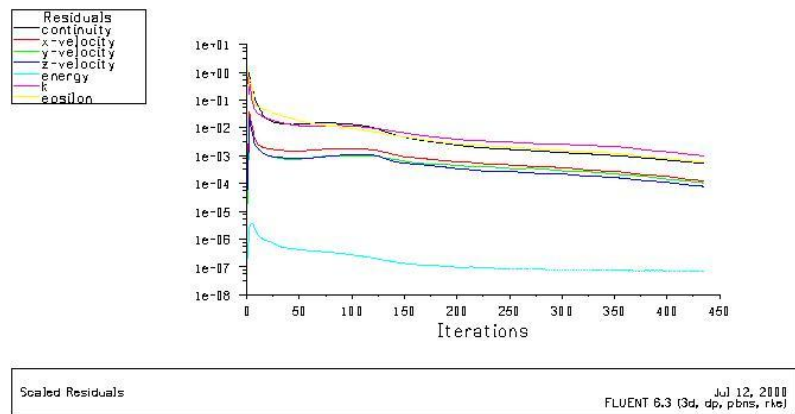


Lampiran Hasil Residual

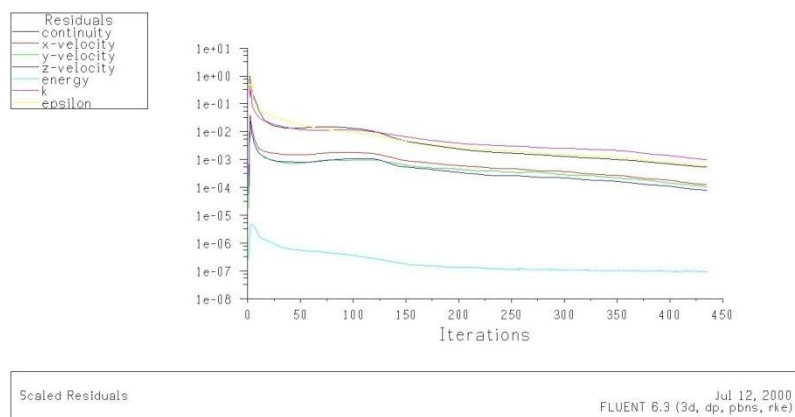
Pada putaran 1000 rpm



Pada putaran 1500 rpm

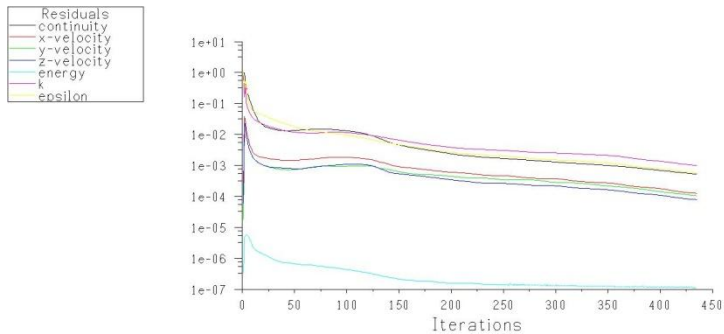


Pada putaran 2000 rpm



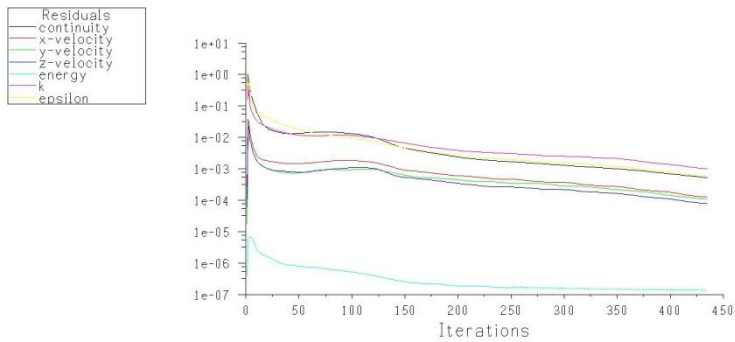


Pada putaran 2500 rpm



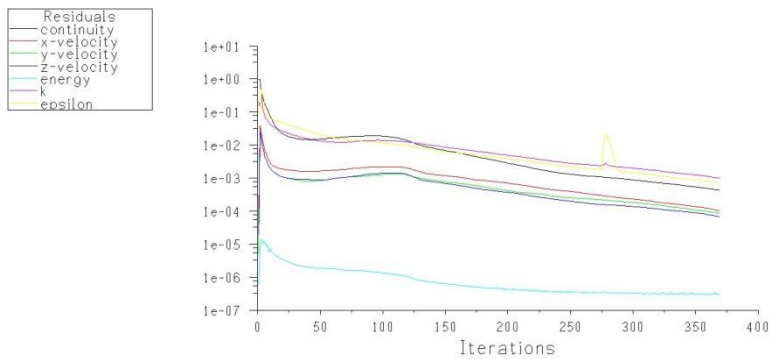
Scaled Residuals
Jul 12, 2000
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)

Pada putaran 3000 rpm



Scaled Residuals
Jul 12, 2000
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)

Pada putaran 5000



Scaled Residuals
Jul 12, 2000
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)



Lampiran Dokumentasi saat pengambilan data





Lampiran Spesifikasi Chassis Dynamometer Dynostar D70

Standard software features:

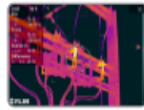
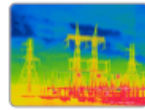
- Static power measurement
- Dynamic power measurement: Roll on, Negative test, All gear, Variable transmission,
Fast acceleration, Multiple speed
- Acceleration test
- Speedometer test
- Weather station
- Power correction to DIN, EEC and SAE standard
- Automatic braking after completing dynamic test
- Real time display of engine speed, power, traction and vehicle speed in software
- Simulation of roller and air resistances for simulating situations on the road
- Automatic calculation of losses in the drive line and calculation of power at crankshaft

Weight:	800 [kg]	1765 [lbs]
Dimensions (l x w x h):	2,53 x 1,22 x 0,83 [m]	100 x 48 x 33 [inch]
Power requirements:	230 [V]	110 [V]
Air requirements:	6 [bar]	6 [bar]
Max. speed:	325 [kmh]	202 [mph]
Drum width:	0,30 [m]	11,8 [inch]
Drum diameter:	0,48 [m]	18,9 [inch]
Total mass inertia:	16,11 [kg/m²]	
Equivalent vehicle mass:	280 [kg]	616 [lbs]
Max. dynamic power:	465 [kW]	624 [Hp]
Max. static power cold:	355 [kW]	476 [Hp]
Max. static power continuous:	139 [kW]	186 [Hp]

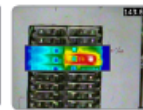
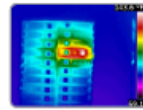


Lampiran Spesifikasi Infrared Camera Flir T420

Applications



Utility Market — Utilities worldwide use infrared cameras to locate problems or to detect hot spots and other problems before they turn into costly failures and production downtime or dangerous electrical fires.



Electrical Inspections — With FLIR thermal imaging cameras electrical contractors can scan electrical cabinets/panels and components for a non-contact view of conditions.

Imaging Specifications

FEATURES	FLIR T420	FLIR T440
Temperature range	-4°F to 1202°F (-20°C to 650°C)	-4°F to 2192°F (-20°C to 1200°C)
Zoom	4X Continuous	8X Continuous
LCD Image Sketch	—	Draw on stored images right on touchscreen
Multi-Spectral Dynamic Imaging (MSX)	IR image with enhanced detail presentation	IR image with enhanced detail presentation
Measurement Presets	—	Presets for standard measurements
Profile Measurement Analysis	—	Shows a live graph of temperatures across a line on the image
COMMON FEATURES		
Frame Rate	60Hz	
Field of view/Minimum focus distance/FOV Match	25° x 19° / 1.31ft (0.4m) / Field of View Match where Digital Image FOV adapts to the IR lens	
Focus	Manual/Automatic	
Thermal sensitivity (N.E.T.D)	<0.045°C at 30°C	
Detector Type - Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer	320 x 240 pixels	
Spectral range	7.5 to 13µm	
Compass	Adds camera pointing direction to each image	
Display	Built-in touch-screen 3.5" color LCD	
Image modes	Thermal/Visual/Fused thermal image/P-4P/MSX (Resizable and movable) and Thumbnail Gallery	
Image Storage	1000 radiometric JPEG images (SD card memory)	
Image annotation	Voice (60 sec); text comments, Sketch, image markers on IR	
Periodic image storage	7 seconds to 24 hours (IR) and 14 seconds to 24 hours (IR and visual)	
Lens	25° (optional 6°, 15°, 45°, 90°, Close up 100, 50µm lenses available)	
Video Lamp	Bright LED lamp	
Laser Classification/Type	Class 2/Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1mW/635nm (red)	
Set-up controls	Mode selector, color palettes, configure info to be shown in image, local adaptation of units, language, date and time formats, and image gallery	
Measurement modes	5 Spotmeters, 5 Box areas, Isotherm, Auto hot/cold spot, Delta T	
Measurement correction	Reflected ambient temperature & emissivity correction	
Video Recording in Camera and Video Streaming	Non-radiometric IR-video recording (MPEG-4 to memory card), Radiometric IR-video streaming (Full dynamic to PC using USB or Wi-Fi), and Non-radiometric IR-video streaming (MPEG-4 using Wi-Fi and uncompressed colorized video using USB)	
Instant Report	Create a Thermographic Inspection report directly in the camera	
Battery Type/operating time	Li-Ion/ >4 hours, Display shows battery status	
Charging system	In camera AC adapter/2 bay charging system	
Shock / Vibration	25G, IEC 60068-2-29 / 2G, IEC 60068-2-6	
Dimensions/Weight	4.2x7.9x4.9" (106x201x125mm)/1.94lbs (0.88kg), including battery	
2-5-10 Warranty	When the camera is registered within 60 days: 2 years on Parts/Labor for the Camera; 5 years of Coverage on Batteries; 10 years of Protection on the IR Detector	



Halaman ini sengaja dikosongkan